



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

# MECHANICKÉ VLASTNOSTI A LOMOVÉ CHOVÁNÍ SVAROVÝCH SPOJŮ A ZÁKLADNÍCH MATERIÁLŮ PŘÍVODNÍHO POTRUBÍ VODNÍ TURBÍNY

MECHANICAL PROPERTIES AND FRACTURE BEHAVIOUR OF WELDED JOINTS AND BASE  
MATERIALS IN WATER TURBINE SUPPLY PIPING

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. VÁCLAV VLK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. LIBOR VÁLKA, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Václav Vlk

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Materiálové inženýrství (3911T011)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

**Mechanické vlastnosti a lomové chování svarových spojů a základních materiálů přívodního potrubí vodní turbíny**

v anglickém jazyce:

**Mechanical properties and fracture behaviour of welded joints and base materials in water turbine supply piping**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V rámci zpracování daného tématu se bude student zabývat hodnocením mechanických vlastností a lomového chování základních materiálů a svarových spojů přívodního potrubí vodní turbíny. Úkolem bude zmapování problematiky, účast při realizaci mechanických zkoušek a dále vyhodnocování výsledků zkoušek a jejich interpretace.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je:

- vyhodnocení a interpretace výsledků mechanických zkoušek (zkoušek tahem, zkoušek rázem v ohybu, zkoušek lomové houževnatosti, zkoušek nízkocyklové únavy)
- posouzení zbytkové životnosti druhého (identického) exempláře přívodního potrubí vodní turbíny s přihlédnutím k existujícím výsledkům fraktografických a dalších analýz

Seznam odborné literatury:

ANDERSON, T. Fracture mechanics: fundamentals and applications. 3rd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, c2005, 621 s. ISBN 0-8493-1656-1.

BROEK, David. Elementary engineering fracture mechanics. 4th rev. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1986, xiv, 516 s. ISBN 90-247-2580-1.

Wallin, K. The scatter in K-results. Eng. Fract. Mech. 19, 1984, s. 1085.

ASTM E 1820 Standard test method for measurement of fracture toughness, 2001.

ASTM E 1921 Standard test method for determination of reference temperature,  $T_0$ , for ferritic steels in transition range, 2005.

Rosinski, S.T., Server, W.L. Application of the Master Curve in the ASME Code. Int. J. Pressure Vessels and Piping 77 (2000), s. 591.

LIKEŠ, Jiří a Josef MACHEK. Matematická statistika. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983, 178 s.

LIKEŠ, Jiří a Josef MACHEK. Počet pravděpodobnosti. 1. vyd. Praha: SNTL, 1981, 159 s.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Libor Válka, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 9.12.2013

L.S.

---

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

**Abstrakt:**

Diplomová práce je zaměřena na hodnocení mechanických vlastností a lomového chování základních materiálů a svarových spojů přívodního potrubí vodní turbíny. Výsledky zkoušek tahem, zkoušek lomové houževnatosti, zkoušek tvrdosti a mikrotvrdosti a dále chemické a metalografické analýzy jsou použity pro vyhodnocení úrovně provozní degradace materiálu konstrukce a k posouzení zbytkové životnosti druhého, identického exempláře přívodního potrubí.

**Abstract:**

The master thesis is focussed on evaluation of mechanical properties and fracture behaviour of basic materials and weld joints of a water turbine supply pipe. The results of tensile tests, fracture toughness tests, hardness and micro-hardness tests and further chemical and metallography analysis are used for operating degradation level evaluation of the construction material and also for a residual operating recognition of the second, identical specimen of supply pipe.

**Klíčová slova:**

svarový spoj, přívodní potrubí, vodní turbína, zkouška tahem, lomová houževnatost, CT těleso, mikrotvrdost, tvrdost, metalografická analýza

**Key Words:**

weld joint, supply pipe, water turbine, tensile test, fracture toughness, compact tension specimen, micro-hardness, hardness, metallography analysis

**Bibliografická citace:**

Vlk V. *Mechanické vlastnosti a lomové chování svarových spojů a základních materiálů přívodního potrubí vodní turbíny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014, 40 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Libor Válka, CSc.

### **Prohlášení o původnosti**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité zdroje a literaturu jsem úplně a správně citoval. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně a může být použita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FSI VUT v Brně.

V Brně, 30. 5. 2014

Václav Vlk

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Liboru Válkovi, CSc. za nezměrnou trpělivost při vedení mé práce. Dále také děkuji všem zaměstnancům Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI, od nichž jsem měl možnost se toho tolik naučit.

## Obsah

Úvod .....	2
1. Specifikace problému .....	3
2. Teoretický přehled problematiky .....	4
2.1. Svarové spoje nelegovaných ocelí.....	4
2.1.1. Vliv teploty na strukturu svarového spoje při tavném svařování .....	4
2.1.2. Vady ve svarových spojích.....	4
2.1.3. Křehký lom ve svarovém spoji.....	5
2.2. Lomová mechanika .....	6
2.2.1. Teplotní závislost lomové houževnatosti .....	6
2.2.2. Součinitel intenzity napětí $K$ .....	8
2.2.3. Vznik stabilního a nestabilního lomu .....	8
2.2.4. Definice $J$ -integrálu .....	9
2.2.5. Určení lomové houževnatosti pomocí $J$ -integrálu.....	10
2.2.6. Konstrukce $J$ - $\Delta a$ křivky.....	12
3. Cíle práce.....	16
4. Materiál a metodiky experimentů.....	17
4.1. Experimentální materiál .....	17
4.2. Orientace zkušebních těles .....	19
4.3. Použité experimentální metody .....	20
4.3.1. Chemická analýza.....	21
4.3.2. Zkoušky tahem .....	21
4.3.3. Kvazistatické zkoušky CT těles excentrickým tahem .....	21
4.3.4. Zkoušky odlehčovací metodou excentrickým tahem .....	22
4.3.5. Měření tvrdosti a mikrotvrdosti.....	22
4.3.6. Metalografická analýza.....	23
5. Výsledky provedených zkoušek.....	24
5.1. Výsledky chemické analýzy .....	24
5.2. Výsledky zkoušek tahem .....	24
5.3. Kvazistatické zkoušky CT těles excentrickým tahem .....	26
5.4. Určení $J$ - $\Delta a$ křivek .....	26
5.5. Výsledky měření tvrdosti a mikrotvrdosti.....	33
5.6. Výsledky metalografické analýzy .....	36
6. Diskuze výsledků .....	37
7. Závěr.....	39
Literatura .....	40
Použité zkratky a symboly .....	41
Použité zkušební stroje a přístroje.....	43
Seznam obrázků a tabulek.....	44
Seznam příloh .....	45



## Úvod

Vlastnosti materiálů, používaných v konstrukcích, jsou často dost odlišné od idealizovaných představ. Obsahují totiž, mimo konstrukčních vrubů, také nehomogenity a technologické vady. Existence i malé necelistvosti v materiálu může být, zejména v kombinaci s náhodným zatěžováním, příčinou vážné havárie.

Tématem diplomové práce je hodnocení mechanických vlastností svarových spojů a základních materiálů přívodního potrubí vodní turbíny. Na materiály svařované konstrukce přívodního potrubí vodní turbíny je kladeno mnoho požadavků. Tyto požadavky se týkají nejen jejich svařitelnosti, ale také jejich mechanických vlastností. Materiál musí být dostatečně pevný a houževnatý, aby odolal deformačním účinkům po svařování a provoznímu zatížení. Přívodní potrubí je totiž podrobena značnému tlaku proudící vody zejména při spouštění turbíny.

Základní svařované materiály musí obsahovat co nejméně vnitřních defektů, zejména metalurgických vad v případě použití lité oceli. Stejně tak svarový spoj musí obsahovat co nejméně technologických vad, což vzhledem k masivnosti konstrukce často není jednoduché zajistit. Musí být dodržena technologie výroby svarového spoje takovým způsobem, aby tepelné a deformační účinky svařovacího procesu měly co nejmenší vliv na kvalitu svaru a tím pádem i celé konstrukce. Právě svarové spoje bývají často příčinou závažných havárií. V důsledku lokálního ohřevu během svařování může, mimo jiné, dojít k nežádoucím změnám ve struktuře materiálu, které mohou v konečném důsledku vést k lomu.

Pro hodnocení kvality svarových spojů a základních materiálů existuje celá řada metod. Jsou to na jedné straně metody, označované jako nedestruktivní, pomocí kterých lze nalézt povrchové i vnitřní vady v materiálu bez nutnosti jeho odběru za účelem výroby zkušebních těles. Tyto metody ale obecně neumožňují posouzení mechanických vlastností materiálů. Mechanické vlastnosti materiálů lze zjistit pomocí jiného typu zkoušek, které lze souhrnně označit jako zkoušky destruktivní. Mechanické charakteristiky jsou v takových případech měřeny na zkušebních tělesech, vyrobených z materiálu odebraného přímo z vyšetřované konstrukce, případně pro tento účel speciálně vyrobeného.

V předložené diplomové práci jsou pro hodnocení vlastností materiálů přívodního potrubí, příp. stupně jejich degradace, použity postupy, spadající do obou výše zmíněných kategorií experimentálních metod. Naměřené mechanické charakteristiky svarových spojů a základních materiálů slouží jako podklad pro hodnocení druhého, identického exempláře přívodního potrubí vodní turbíny.

## 1. Specifikace problému

Spirály přívodních potrubí vodních turbín se obvykle vyrábějí ze šedé litiny, z lité oceli, nebo z ocelových plechů. Plechové spirály jsou obvykle sestaveny ze segmentů, vzájemně spojených nýtováním nebo svařováním [1].

Naváděcí spirála, která je předmětem zájmu předkládané diplomové práce, je vyrobena z oceli 10 373. Jedná se o nízkouhlíkovou ocel s nezaručeným chemickým složením a relativně vysokým obsahem nečistot. Tvářené segmenty spirály přívodního potrubí navazují na její vnitřní litou část. Vedle případné náchylnosti základních materiálů ke křehkému porušení je hlavním rizikovým faktorem z hlediska potenciální křehkosti konstrukce zejména přítomnost svarů, kterými jsou jednotlivé části spirály spojeny. Více než padesátiletá provozní expozice, neznámé, příp. nedostupné materiálové charakteristiky spolu s vědomím, že už v době spouštění zařízení do provozu existovaly ve svarech či jejich těsném sousedství vady, představují zcela zásadní důvod, proč je nutné zabývat se aktuálním stavem konstrukce z pohledu rizika vzniku některého z v úvahu přicházejících typů porušení.

Prakticky jedinou možností, jak posoudit stav druhého exempláře přívodního potrubí je detailní strukturní analýza a analýza mechanických vlastností materiálů, odebraných z jedné ze dvou provozovaných spirál.

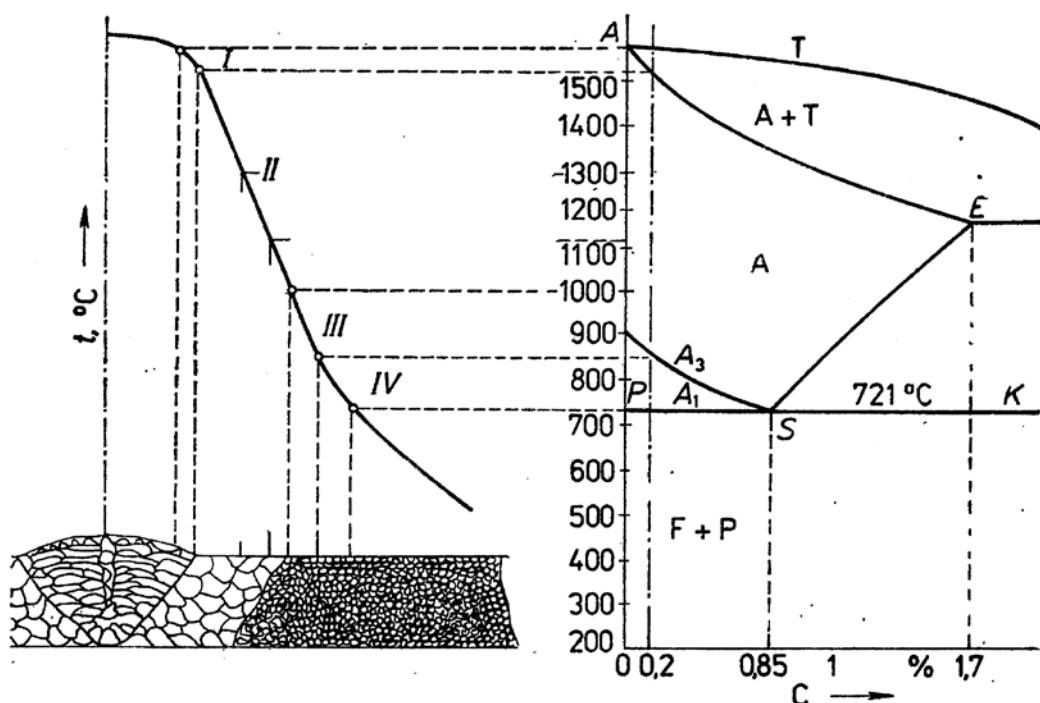
## 2. Teoretický přehled problematiky

### 2.1. Svarové spoje nelegovaných ocelí

#### 2.1.1. Vliv teploty na strukturu svarového spoje při tavném svařování

Díky velkému teplotnímu rozdílu při svařování vznikají ve svarovém spoji různé strukturní změny, které jsou dány průběhem, tvarem a vzdáleností teplotního pole od osy svaru. Výsledná struktura je závislá na chemickém složení materiálu a jeho předchozím a následném tepelném a mechanickém zpracování.

Struktury v různých pásmech svarového spoje nelegované oceli s asi 0,2 hm. % C jsou znázorněny na obr. 1.



Obr. 1 Vliv tepelného účinku svařování na strukturu svarového spoje

I - částečné natavení, II – přehřátí, III – normalizace, IV - částečná překrystalizace [2]

#### 2.1.2. Vady ve svarových spojích

Defekty, které mohou vzniknout při ochlazování svarových spojů, označujeme jako trhliny za horka. Trhliny v nelegovaných ocelích rozdělujeme na trhliny krystalizační, které vznikají v průběhu krystalizace, a likvační, které vznikají v důsledku nepříznivého působení nečistot.

Nízkotavitelné sulfidy a fosfidy vytváří eutektika se železem. Z nich se při opětovném natavení mohou šířit trhliny.

Při chladnutí svarového kovu mohou ještě vzniknout trhliny za studena. Atmosférická vlhkost, nebo vlhkost z přídavných materiálů nebo tavidel způsobí difuzi vodíku do svařovaného materiálu. Pokud se ve svaru nachází tvrdá martenzitická nebo bainitická struktura a ve svaru působí napětí, vzniká nebezpečí vzniku mikrotrhliny na hranici mezi nataveným kovem a základním materiálem [2].

Během svařování dochází k vylučování plynů, obsažených v tekutém kovu. Pokud je chladnutí rychlé, tuhnoucí kov brání jejich odchodu a ve svarovém kovu mohou vnikat bubliny. Shluky plynových bublin jsou nebezpečné, protože hrozí riziko jejich spojení a vzniku lomové plochy.

Ve svarových spojkách může být množství vměstků. Vměstky, které mají ostré okraje, působí jako výrazný koncentrátor napětí [3].

Pokud nejsou svarové plochy dostatečně nataveny a nespojí se se svarovým kovem, spoj bude neprovařen. Je tak zeslaben nosný průřez svaru a neprovařená část se projevuje také vrubovým účinkem.

Na okrajích svarové housenky mohou vzniknout vruby a zápaly, které také mohou působit jako iniciátory trhlin.

### **2.1.3. Křehký lom ve svarovém spoji**

Při svařování dochází ke značnému přívodu tepla, aby se přídavný i základní materiál natavily. Protože ohřívaná oblast zpravidla bývá malá vzhledem k rozměrům svařované konstrukce, dochází k velkému odvodu tepla ze svařované části i z tepelně ovlivněné zóny (TOZ) [2].

Svary se vytváří za pomoci přídavného materiálu, který může mít nízkou houževnatost, zejména pokud bude mít po svařování hrubé zrno. Obecným požadavkem je, aby houževnatost svarového kovu byla větší, než houževnatost základních materiálů.

V přechodové oblasti mezi svarovým kovem a tepelně ovlivněnou zónou dochází k natavení materiálu. Pokud bude ochlazení rychlé, může zde dojít nejen ke vzniku chemické heterogenity, ale také ke vzniku křehkých martenzitických a bainitických struktur.

V bezprostředním sousedství natavené oblasti nastává obvykle značný růst velikosti zrna. Tento jev má za následek zkřehnutí materiálu v této oblasti, protože houževnatost úzce souvisí s velikostí zrna. Obecně platí, že s rostoucí velikostí zrna houževnatost klesá.

Po vychladnutí materiálu vznikají vnitřní pnutí, která mohou dosáhnout i jeho meze kluzu a způsobit plastickou deformaci [2]. U materiálů s obsahem uhlíku do 0,2 hm % může dojít k vystárnutí oceli, a to jak procesem tepelným, tak deformačním. To má za následek zvýšení pevnosti a tvrdosti, ale snížení plastických vlastností a houževnatosti.

## 2.2. Lomová mechanika

Studiem chování tělesa s trhlinou se zabývá lomová mechanika, která, mimo jiné, zavádí pojmy stabilní a nestabilní lom. V obou případech dochází k iniciaci trhliny po překročení jisté úrovně zatížení. V případě stabilního lomu je šíření trhliny řízeno růstem vnějšího zatížení. Při nestabilním lomu dochází k nekontrolovanému růstu trhliny pouze pod účinkem energie (napětí), naakumulované v tělese.

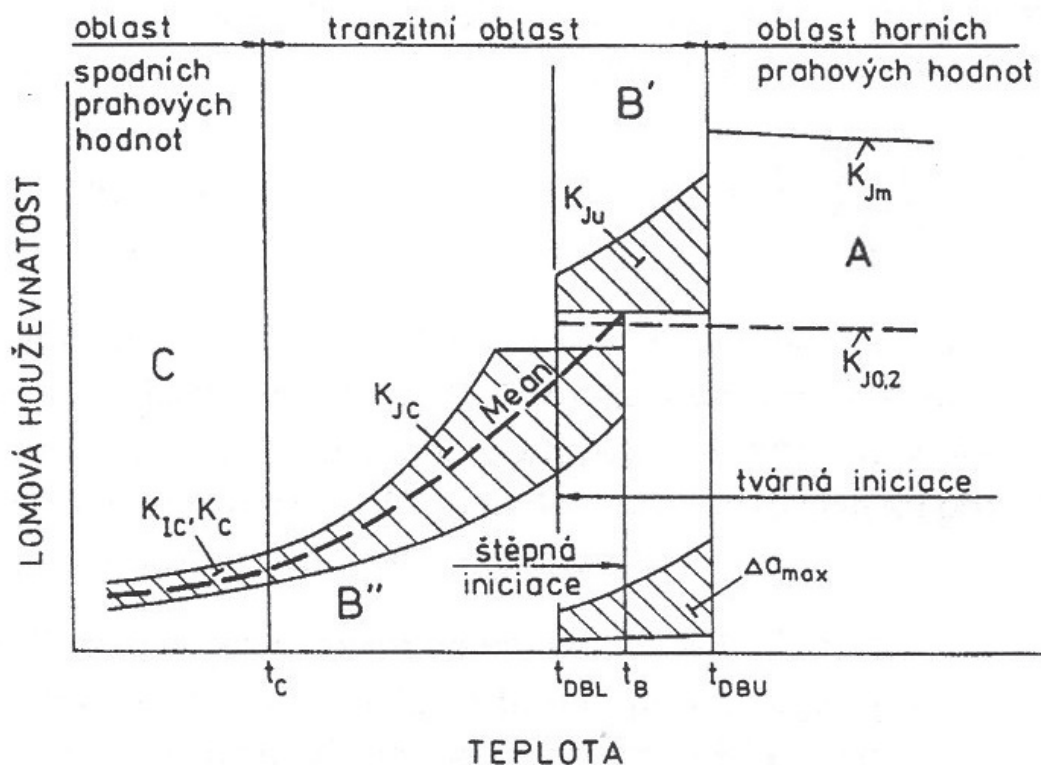
Lomovou mechaniku lze rozdělit do dvou základních směrů. Určujícím faktorem pro toto rozdělení je velikost plastické zóny na čele trhliny. Lineární elastická lomová mechanika (LELM) předpokládá rozsah plastické deformace v okolí kořene trhliny zanedbatelně malý ve srovnání s rozměry zkušebního tělesa. V okolí trhliny platí stav rovinné deformace a předpokládá se lineární závislost mezi napětím a deformací v oblasti kořene trhliny. LELM je založena na kritériu faktoru intenzity napětí  $K$ . Elasticko-plastická lomová mechanika (EPLM) naproti tomu uvažuje existenci větší plastické zóny (plastické deformace) před čelem trhliny. V tomto případě nejsou v okolí kořene trhliny splněny podmínky stavu rovinné deformace, platí podmínky stavu rovinné napjatosti. Ztrátě stability trhliny předchází její pomalý, stabilní růst. EPLM je založena na využití energetického kritéria.

Lomová mechanika rovněž zavádí pojem lomové houževnatosti, vyjadřující odpor materiálu vůči vzniku a šíření nestabilní trhliny. Lomová houževnatost je ovlivněna chemickým složením, mikrostrukturou materiálu a pracovní teplotou [4].

Při stanovení lomové houževnatosti v rámci řešení úkolů diplomové práce bylo použito koncepce elasticko-plastické lomové mechaniky, jmenovitě  $J$ -integrálu a konstrukce  $J$ - $\Delta a$  křivky pro hodnocení stabilního růstu trhliny.

### 2.2.1. Teplotní závislost lomové houževnatosti

Lomová houževnatost je závislá na více faktorech. Z hlediska řešené problematiky je důležitá její závislost na teplotě. Obecné schéma teplotní závislosti lomové houževnatosti je uvedeno na obr. 2.



Obr. 2 Schéma teplotní závislosti lomové houževnatosti [5]

Schéma je možné rozdělit podle teploty zkoušení na několik oblastí. Jsou to oblast horních prahových hodnot lomové houževnatosti, tranzitní oblast a oblast spodních prahových hodnot lomové houževnatosti [5]. Oblast horních prahových hodnot lomové houževnatosti je ve schématu označena jako A. Dochází v ní k plastické deformaci a k tvárnému lomu při stabilním šíření trhliny. Lomová houževnatost je zde udávána hodnotou  $K_{J0,2}$ , popřípadě hodnotou lomové houževnatosti  $K_{Jm}$ , určenou pro okamžik dosažení maximální zatěžovací síly  $F_m$ . Oblast B je tranzitní oblastí. K porušení zde dochází nestabilním křehkým lomem. Oblast je možné rozdělit podle iniciace lomu na dvě, zčásti se překrývající, části. V horní tranzitní oblasti B', vymezené teplotami  $t_{DBU}$  a  $t_{DBL}$  (ductile brittle upper, ductile brittle lower) ke křehkému porušení dochází po předchozím krátkém tvárném růstu trhliny. Ve spodní tranzitní oblasti B'', vymezené teplotami  $t_c$  (cleavage) a  $t_B$  (brittleness), již nestabilní křehký lom vzniká přímo v místě původní trhliny. V horní tranzitní oblasti B' vyjadřujeme lomovou houževnatost veličinou  $K_{Ju}$ . Ta je definována jako lomová houževnatost přepočtená z  $J_u$  integrálu určeného pro okamžik iniciace nestabilního křehkého lomu po krátkém tvárném růstu trhliny u kořene původní trhliny. Ve spodní tranzitní oblasti B'' pak vyjadřujeme lomovou houževnatost hodnotou  $K_{Jc}$ . Oblast C je oblastí spodních prahových hodnot lomové houževnatosti. K porušení zde dochází křehkým lomem. Lomová houževnatost je vyjádřena parametrem  $K_{Ic}$ . Pokud nebyla zachována podmínka rovinné deformace, vyjadřujeme jej parametrem  $K_C$ .

### 2.2.2. Součinitel intenzity napětí $K$

Součinitel intenzity napětí  $K$  definuje podmínky napjatosti na čele trhliny. Na čelo trhliny působí jeden ze tří typů zatížení [6].

- mód I – tah - tahové napětí je kolmé k rovině trhliny
- mód II – smyk - napětí je rovnoběžné s rovinou trhliny a kolmé k jejímu čelu
- mód III – střih - napětí je rovnoběžné s rovinou trhliny a jejím čelem
- 

Složitější případy zatížení tělesa lze potom vyjádřit kombinací těchto módů.

Zatížení tělesa s trhlinou v módu I je v praxi nejčastějším řešeným případem. Pro tento druh zatížení je možné součinitel intenzity napětí  $K_I$  zformulovat jako

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} Y\left(\frac{a}{W}\right), \quad (1)$$

kde  $Y\left(\frac{a}{W}\right)$  je tzv. tvarová funkce závislá na rozměrech tělesa, délce, tvaru a poloze trhliny,  $\sigma$  je působící napětí,  $\pi$  je Ludolfovo číslo,  $a$  je délka trhliny.

### 2.2.3. Vznik stabilního a nestabilního lomu

Podle Griffithovy koncepce definujeme hodnotu kritického napětí jako [7]

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}}, \quad (2)$$

kde  $a$  je délka trhliny,  $E$  je modul pružnosti,  $\gamma$  je měrná povrchová energie nově vzniklých povrchů.

Trhlina se stane nestabilní při platnosti podmínky

$$\frac{\pi \sigma^2 a}{E} = 2\gamma. \quad (3)$$

Levá část vztahu (3) představuje tzv. hnací sílu trhliny  $G$ , pravá část odpor materiálu vůči nestabilnímu šíření trhliny  $R$  [7].

Odpor materiálu proti nestabilnímu šíření trhliny  $R$  je materiálová vlastnost. K růstu trhliny dochází v případě, že hodnota  $G$  dosáhne hodnoty  $R$ . V případě ideálně křehkého materiálu ve stavu rovinné deformace je odpor proti růstu trhliny konstantní. Délka trhliny v ideálně křehkém materiálu je konstantní až do okamžiku rovnosti hnací síly trhliny  $G$  a odporu materiálu vůči jejímu šíření  $R$ .

V případě tvárného materiálu dochází k postupnému růstu trhliny. Úměrně s ní se zvětšuje plastická zóna před jejím čelem a odpor materiálu vůči šíření trhliny  $R$ . Teprve při rovnosti hnací síly trhliny  $G$  a odporu materiálu vůči šíření trhliny  $R$  se začne trhlina šířit nestabilně.

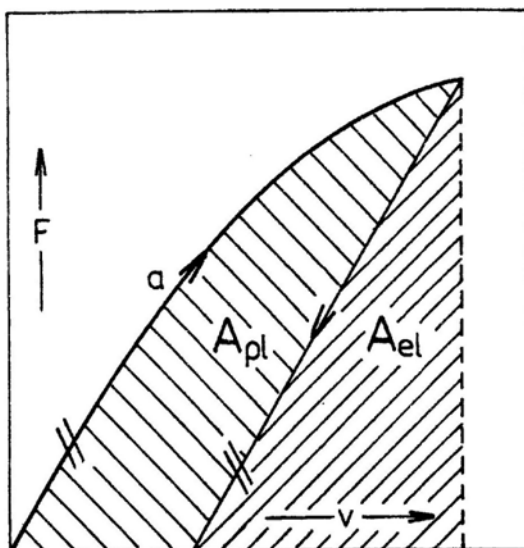
#### 2.2.4. Definice $J$ -integrálu

Při tahovém módu I představuje integrál  $J_I$  změnu potenciální energie tělesa  $dW$  při změně délky trhliny o  $da$

$$J_I = -\frac{dW}{da} . \quad (4)$$

$J$ -integrál definuje plochu pod křivkou v diagramu síla-přemístění síly. Plocha pod křivkou je rozdělena na elastickou a plastickou část. Hodnota  $J$ -integrálu je tedy dána součtem elastické a plastické části práce, viz obr. 3.

$$J = J_{el} + J_{pl} . \quad (5)$$

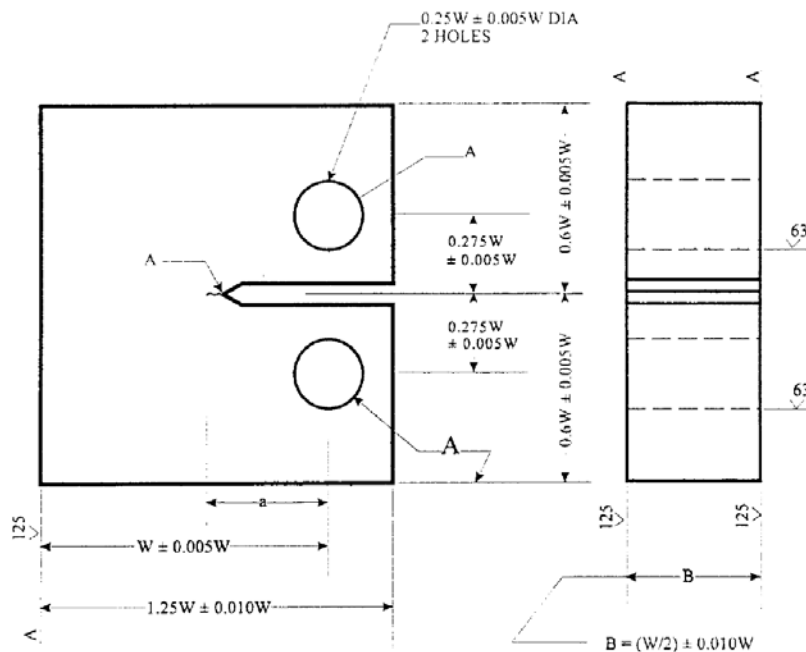


Obr. 3 Rozdělení  $J$ -integrálu na elastickou a plastickou složku práce [8]



### 2.2.5. Určení lomové houževnatosti pomocí $J$ -integrálu

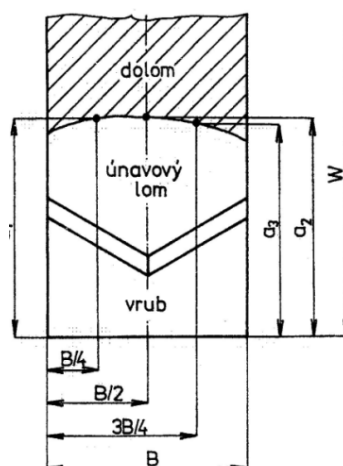
Lomovou houževnatost lze experimentálně měřit způsobem a postupem uvedeným v normě ASTM E1820-01[9], která zavádí pro její měření tři typy zkušebních těles, odlišujících se tvarem a způsobem zatěžování. Zkušební těleso pro zatěžování excentrickým tahem (compact tension, CT) je znázorněné na obr. 4.



Obr. 4 Zkušební těleso CT [9]

$a$ -počáteční délka trhliny,  $B$ -šířka zkušebního tělesa,  $W$ -tloušťka zkušebního tělesa

Geometrické rozměry zkušebního tělesa  $B$  a  $W$  se měří před provedením zkoušky. Při vlastní zkoušce se měří závislost zatěžovací síly  $F$  na hodnotě přemístění síly, nebo na hodnotě rozevření vrubu. Určí se také hodnota provedené plastické práce  $A_{pl}$ . Po provedené zkoušce se změří délka nacyklované počáteční trhliny  $a$ , která je na zkušebním tělese dobře viditelná jako hranice mezi únavovým lomem a dolomem tělesa. Toto rozhraní má tvar prostorové křivky. Délka trhliny je definovaná od osy zatěžování, čili od středů otvorů pro zavěšovací čepy. V praxi se tedy měří trhlina od okraje zkušebního tělesa a od této hodnoty se odečítá vzdálenost středů otvorů od okraje tělesa, viz obr. 5.



Obr. 5 Měření délky trhliny na rozlomeném tělese [8]

Počáteční délka trhliny je určena aritmetickým průměrem měření délky na třech, případně devíti místech. Žádná z naměřených hodnot se nesmí lišit o více jak 2,5%  $W$  a žádné dvě naměřené délky se nesmí lišit o více jak 5%  $W$ , čili rozdíl délky trhliny na okrajích a uprostřed tělesa nesmí být příliš velký [8].

Elastická složka práce je v grafu síla-přemístění síly shora vymezena rovnoběžkou s lineární částí zatěžovací křivky. Pro tahový mód I je při stavu rovinné deformace definována jako [9]

$$J_{el} = \frac{1 - \nu^2}{E} K_I^2, \quad (6)$$

kde  $E$  je modul pružnosti,  $\nu$  je Poissonova konstanta a  $K_I$  je součinitel intenzity napětí pro tahový mód I. Ten se pro CT těleso určí ze vztahu [9]

$$K_I = \frac{F}{BW^{1/2}} \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right)}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[0,866 + 4,64 \left(\frac{a}{W}\right) - 13,32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14,72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5,6 \left(\frac{a}{W}\right)^4\right], \quad (7)$$

kde  $F$  je zatěžovací síla,  $B$  je tloušťka zkušební tělesa,  $W$  je šířka zkušební tělesa,  $a$  je délka trhliny.

Plastická složka  $J$ -integrálu se v případě použití CT tělesa stanoví jako

$$J_{pl} = \frac{\left(2 + 0,522 \left(1 - \frac{a}{W}\right)\right) A_{pl}}{B(W - a)}, \quad (8)$$

kde se plastická práce  $A_{pl}$  stanoví z plochy, vymezené záznamem grafu síla-přemístění síly.

Vypočtená hodnota  $J$ -integrálu  $J_{IC}$ , tzn. hodnota integrálu, odpovídající počátku stabilního šíření trhliny je platná, pokud splňuje požadavek na délku nacyklované trhliny

$$0,45 \leq \frac{a}{W} \leq 0,55, \quad (9)$$

a podmínku stavu rovinné deformace

$$\min(b, a, W - a) \geq 25 \frac{J_{IC}}{R_{p0,2}}. \quad (10)$$

Hodnotu integrálu  $J_{IC}$  lze přepočítat na hodnotu lomové houževnatosti  $K_{JC}$  pomocí vztahu

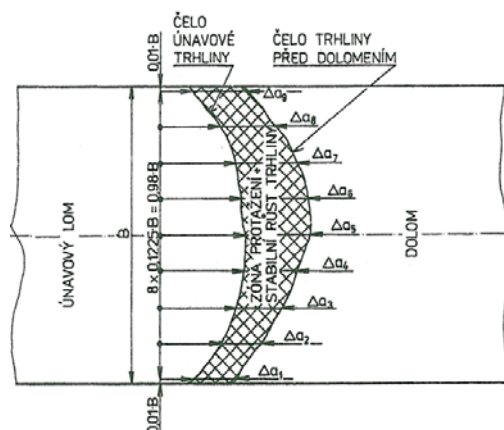
$$K_{JC} = \left( \frac{E}{1 - \nu^2} J_{IC} \right)^{1/2}. \quad (11)$$

### 2.2.6. Konstrukce $J$ - $\Delta a$ křivky

V případě, že v materiálu během zkoušky v horních prahových oblastech dojde k iniciaci a stabilnímu růstu tvárné trhliny, je možné získat závislost  $J$ -integrálu na přírůstcích délky trhliny  $\Delta a$ , čili tzv.  $J$ - $\Delta a$  křivky. Tato metoda se úspěšně používá tam, kde se hodnotí integrita konstrukcí s defektem. Aplikuje se velmi často při posuzování defektů v potrubích a tlakových zařízeních [10].

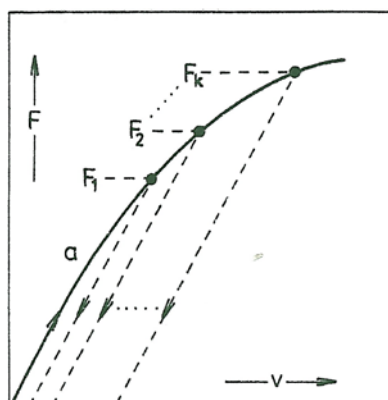
Podle způsobu určení  $J$ - $\Delta a$  křivek se hovoří o metodě jednoho tělesa, nebo o metodě více těles [11].

V případě metody více těles je použito nejméně šest stejně velkých zkušebních těles, ve kterých je nacyklována trhlina o přibližně stejné délce  $a_0$ . Každé z těchto těles se zatíží na jinou úroveň zatěžovací síly  $F$ , tak aby velikosti tvárního natržení byly rovnoměrně rozloženy mezi nulovou hodnotou a hodnotou  $\Delta a$  při maximální síle  $F_{max}$ . Pro každé takové těleso se určí přírůstek trhliny  $\Delta a$ . Plocha tvárního natržení se před dolomením tělesa zvýrazní vyžiháním. Oxidace povrchu lomové plochy zkušební tělesa vyvolá barevný kontrast, díky kterému se přírůstek  $\Delta a$  snadno určí měřením, viz obr. 6. Pro každé zkušební těleso se pak vypočte  $J$ -integrál z křivky závislosti síla - přemístění síly [11].



Obr. 6 Měření přírůstku délky trhliny  $\Delta a$  [8]

V případě metody jednoho zkušební tělesa se toto zkušební těleso v pravidelných intervalech zatěhuje a ihned částečně odlehčuje, viz obr. 7.



Obr. 7 Záznam síla-přemístění síly při zatěžování a odlehčování zkušební tělesa [8]

Ze směrnic úseček, vzniklých na diagramu síla - rozevření vrubu ( $V$ ), popř. síla - přemístění síly ( $f$ ) opakovaným zatěžováním, se určí elastická poddajnost tělesa  $C$ . Sleduje se její změna v závislosti na hodnotě  $F$ - $V$ ,  $f$ . Elastická poddajnost je dána vztahem [4]

$$C = \frac{dV}{dF} = \frac{df}{dF}, \quad (12)$$

kde  $dV$  a  $df$  jsou přírůstky hodnot rozevření vrubu nebo přemístění síly,  $dF$  je přírůstek síly. Počátek změn elastické poddajnosti je roven počátku stabilního šíření trhliny.

Hodnota prodloužení trhliny  $\Delta a$ , změřená po dolomení zkušebního tělesa, je vydělena počtem zatěžovacích cyklů, které následovaly po počátku stabilního šíření trhliny. Pro každý tento zatěžovací cyklus se vypočítá  $J$ -integrál, odpovídající jednotlivým zatěžovacím silám a práci v zatěžovacím cyklu.

V grafu  $J$ - $\Delta a$  se stanoví tzv. čára otupení (blunting line), definovaná smluvně pro hodnotu rozevření vrubu 0,2 mm. V této vzdálenosti je proces otupování kořene trhliny vystřídán jejím subkritickým růstem.

Sklon čáry otupení je dán rovnicí [9]

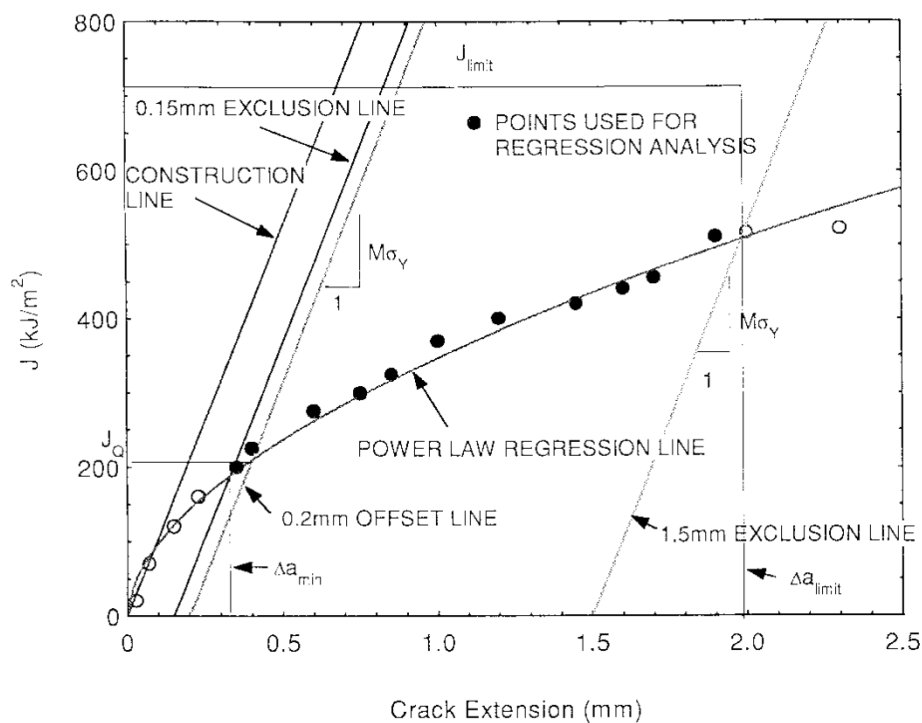
$$J = 2R_{p0,2}\Delta a. \quad (13)$$

K čáře otupení se vedou rovnoběžky ve vzdálenosti 0,15 a 1,5 mm na ose rozevření trhliny. Hodnoty  $J$ -integrálu, vymezené na ploše těmito přímkami jsou proloženy regresní přímkou [9]

$$J = C_1(\Delta a)^{C_2}, \quad (14)$$

kde  $C_1$  a  $C_2$  jsou regresní konstanty.

Hodnota  $J_{0,2}$  integrálu je potom definována jako průsečík regresní přímky čáry otupení s křivkou  $J$ - $\Delta a$ , viz obr. 8.



Obr. 8 Stanovení hodnoty  $J_{0,2}$  [9]

Rovnoběžky 0,15 a 1,5 mm na ose rozevření trhliny vymezují platnost hodnot  $J$ -integrálu. Platnost hodnot  $J$ -integrálu je omezena také horní limitní hodnotou

$$J_{lim} = \frac{(W - a)R_{p0,2}}{15} . \quad (15)$$

Aby byla určená  $J$ - $\Delta a$  křivka platná, musí ve vymezené oblasti ležet alespoň 6 naměřených hodnot  $J$ -integrálu.

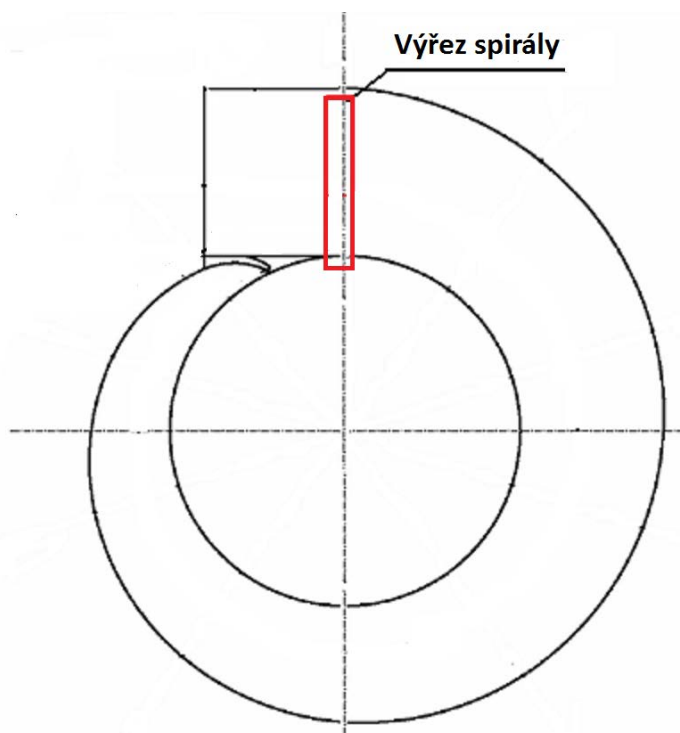
### 3. Cíle práce

Diplomová práce je zaměřena na hodnocení mechanických vlastností a lomového chování základních materiálů a svarových spojů přívodního potrubí vodní turbíny. V praktické části práce budou realizovány zkoušky tahem a zkoušky lomové houževnatosti. Zkoušky tahem budou provedeny při několika teplotách na zkušebních tělesech ze svarového kovu, z litého i tvářeného materiálu a z materiálu v jejich tepelně ovlivněných zónách. Zkoušky lomové houževnatosti budou realizovány za různých teplot na tvářeném materiálu, jeho tepelně ovlivněné oblasti a na svarovém kovu. Lomová houževnatost bude vyjádřena  $J$ -integrálem, na jehož základě budou zkonstruovány  $J$ - $\Delta a$  křivky. Naměřené hodnoty materiálových charakteristik spolu s výsledky měření tvrdosti, mikrotvrdosti a chemické a metalografické analýzy budou sloužit jako podklad pro hodnocení stavu podobného exempláře přívodního potrubí vodní turbíny.

## 4. Materiál a metodiky experimentů

### 4.1. Experimentální materiál

Experimentální materiál byl získán vyřezáním z části spirály přívodního potrubí vodní turbíny, základním materiálem je ocel 10 373. Výřezem je deska s rozměry přibližně  $30 \times 2680 \times 450$  mm. Jedná se o dvě svařené části tvářených segmentů. Výřez plynule navazuje svarem na vnitřní část spirály, která je litá. Na obr. 9 je znázorněna poloha vyříznutého plechu ze spirály přívodního potrubí.



Obr. 9 Schéma spirály přívodního potrubí vodní turbíny s vyznačeným místem odběru materiálu pro výrobu zkušebních těles

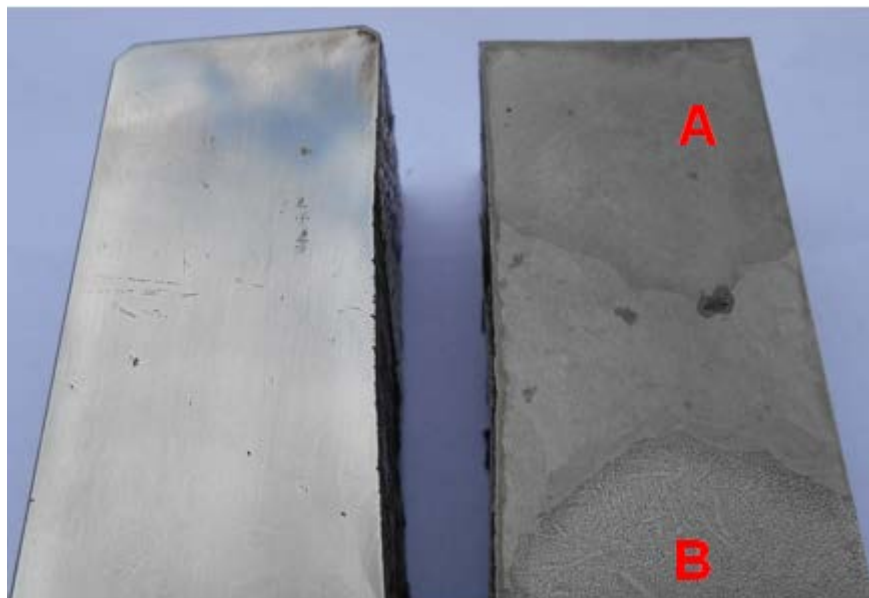
Vyříznutý oblouk byl rozdělen na několik segmentů, z nichž byla vyrobena zkušební tělesa pro jednotlivé zkoušky. Jeden ze segmentů byl podroben ultrazvukové analýze, při které bylo zjištěno více indikací výskytu defektů (výskyt vad ve svarech i základních materiálech byl zjištěn výrobcem již v době uvádění konstrukce do provozu). Při bližším zkoumání pak byly tyto indikace identifikovány nejen jako neprovařená místa větších rozměrů s původním zoxidovaným povrchem, ale také jako velké množství dutin a pórů ve svaru i základním materiálu. Seskupení menších vad se při ultrazvukové zkoušce jevílo jako větší indikace. Podoba těchto vad je znázorněna na následujících snímcích. Na obr. 10 je vidět jedna z vypreparovaných vad o rozměrech cca  $30 \times 25$  mm, objevených na lomové ploše zkušebního tělesa pro zkoušku lomové houževnatosti.





Obr. 10 Vypreparovaná vada

Příklad nalezených vad menších rozměrů je demonstrován na obr. 11. Snímek znázorňuje svar mezi tvářenou (A) a litou (B) částí spirály. V pravé části snímku je svar zviditelněn leptáním 2% Nithalem, na levém je identický zrcadlově obrácený vzorek s vyleštěnou plochou, na které je dobře patrné seskupení vad různého druhu.

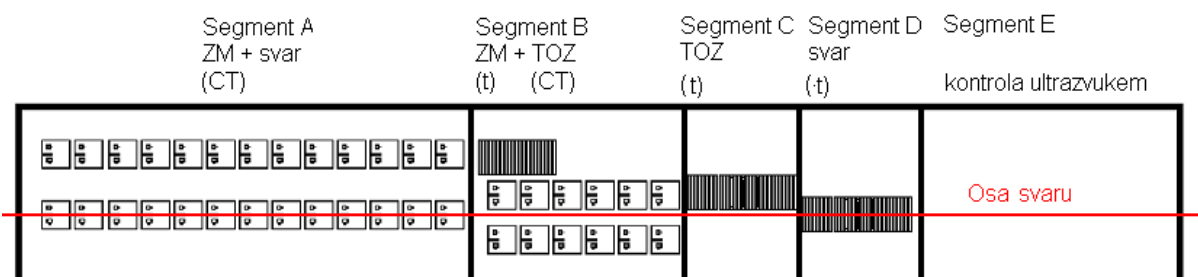


Obr. 11 Menší vady v materiálu

Vnitřní i vnější povrch polotovarů byl pokryt nátěrovou hmotou. Nátěr souvisle pokrýval celý povrch, nebyl však příliš přílnavý, při řezání vzorků se začal odlupovat.

#### 4.2. Orientace zkušebních těles

Dodaná deska byla rozřezána na několik segmentů, ze kterých byla vyrobena zkušební tělesa pro jednotlivé zkoušky, viz schéma na obr. 12.



Obr. 12 Schéma umístění jednotlivých typů zkušebních těles. CT – zkušební tělesa pro zkoušku lomové houževnatosti, t – vzorky pro zkoušku tahem

Zkušební tělesa pro zkoušky lomové houževnatosti byla orientována ve směru válcování tvářené části materiálu. V případě vzorků z oblasti svarového spoje byla tělesa vyrobena tak, že osa svaru prochází rozevíranou částí tělesa, kde se při přípravě vzorku cykluje únavová trhlina. Zkušební tělesa pro zkoušku tahem byla orientována svou délkou k příčnému směru válcování. Tělesa ze svarové části byla řezána tak, že svar prochází jejich měrnou částí.

V tab. 1 je uveden přehled označení jednotlivých zkušebních těles pro mechanické zkoušky.

Tab. 1 Označení použitých vzorků (TOZ-tepelně ovlivněná zóna)

	Zkoušky tahem	Zkoušky lomové houževnatosti	Určení $J-\Delta a$ křivek
<b>Základní materiál - plech ze svaru plech/plech</b>	BK 31	LH 301	LA 101
	BH 34		LA 102
	BK 36		LH 303
	BH 31		LH 304
<b>Základní materiál - plech ze svaru plech/odlitek</b>	JK 11		
	JH 12		
	JH 13		
	JK 12		
<b>Základní materiál - odlitek</b>	H 81		
	K 14		
	H 83		
	K 11		
<b>TOZ plechu svaru plech/plech</b>	CH 102	LB 301	LB 201
	CK 106	LB 302	LB 202
	CK 110		LH 201
	CH 106		LH 202
<b>TOZ odlitku svaru plech/odlitek</b>	H 21		
	H 51		
	H 23		
	H 52		
<b>Svar plech/plech</b>	DK 101		LA 200
	DH 105		LA 202
	DH 110		
	DK 105		
<b>Svar plech/odlitek</b>	JH 1		
	JK 2		
	JK 3		
	JH 2		

#### 4.3. Použité experimentální metody

V rámci diplomové práce byly provedeny následující experimenty:

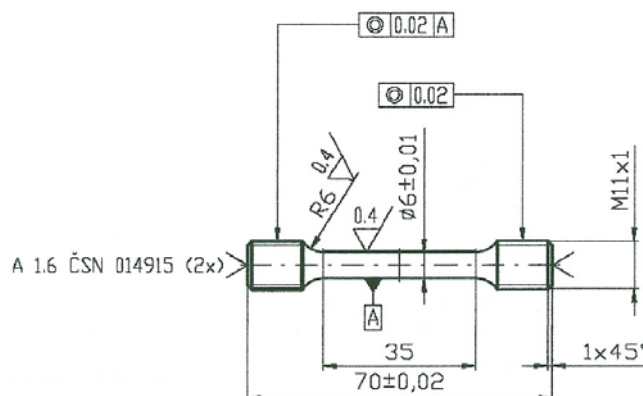
- chemická analýza,
- zkoušky tahem při teplotách 20 °C a 0 °C základního materiálu, materiálu z tepelně ovlivněné zóny a svarového kovu,
- zkoušky lomové houževnatosti na CT tělesech při teplotách 20 °C a 0° C,
- určení  $J-\Delta a$  křivek,
- zkoušky tvrdosti a mikrotvrdosti svaru,
- metalografická analýza.

#### 4.3.1. Chemická analýza

Chemická analýza byla provedena v laboratoři společnosti Moravské kovárny, a.s. na spektrometru s jiskrovým buzením SPECTROLAB. Byla provedena analýza tvářené části segmentu spirály, lité části a svarového kovu.

#### 4.3.2. Zkoušky tahem

Zkoušky tahem byly provedeny podle normy ČSN EN 10002-1 [12] na zkušebních tyčích  $6 \times 30$  mm se závitovými hlavami, viz obr. 13. Počáteční měrná délka 30 mm byla na vzorcích vyznačena ryskami. Před zkouškou byly na všech vzorcích změřeny průměry měrné části. Vlastní zkoušky tahem byly provedeny na elektromechanickém zkušebním stroji ZWICK Z050. Zkoušky byly realizovány při pokojové teplotě a při teplotě  $0^\circ\text{C}$ , s rychlostí pohybu příčnicku 2 mm/min. Prodloužení bylo měřeno kontaktním snímačem ZWICK MACRO. Experimenty byly vyhodnoceny softwarem ZWICK TestXpert. Kontrakce byla určena na základě rozměrů zkušebních těles, naměřených po ukončení zkoušky.

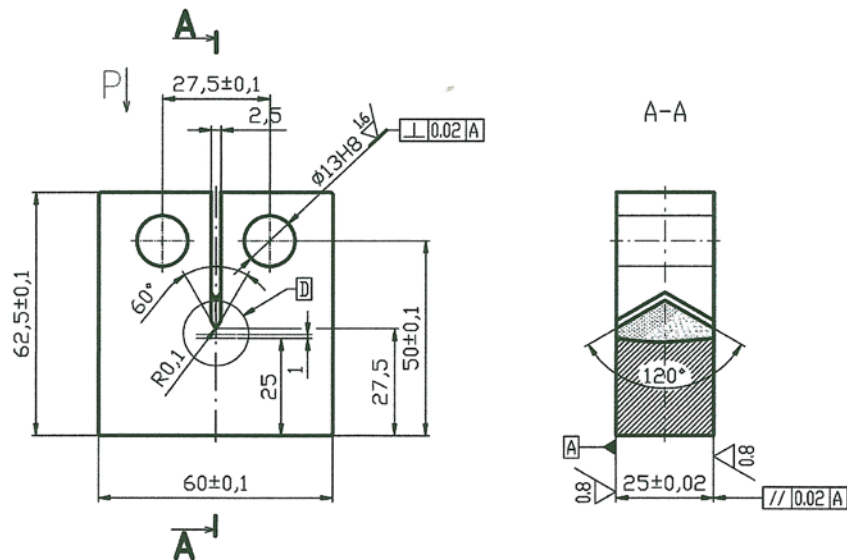


Obr. 13 Geometrie zkušebních těles pro zkoušku tahem

#### 4.3.3. Kvazistatické zkoušky CT těles excentrickým tahem

Zkoušky excentrickým tahem CT těles (compact tension) byly provedeny na standartních tělesech dle normy ASTM E 1820 - 01 [9] s nacyklovanou trhlinou (obr. 14). Jmenovité rozměry pro zkušební těleso CT jsou šířka tělesa  $W = 50$  mm, tloušťka  $B = 25$  mm a délka nacyklované trhliny  $a = 25$  mm. Nejprve byla provedena na některých tělesech kvazistatická zkouška pro zjištění lomového chování materiálu za snížených teplot. Vybráno bylo jedno těleso ze základního materiálu plechu (LH301) a dvě tělesa z tepelně ovlivněné zóny plechu (LB301 a LB302). První těleso bylo testováno při teplotě  $0^\circ\text{C}$ , druhá dvě při teplotách  $0^\circ\text{C}$  a

-20 °C. Zkouška byla provedena na zkušebním stroji Zwick 1382 při rychlosti zatěžování 1 mm/min. Zkouška při teplotě  $-20 \pm 1$  °C byla provedena v kryostatu ochlazovaném parami kapalného dusíku.



Obr. 14 Geometrie použitých CT těles

#### 4.3.4. Zkoušky odlehčovací metodou excentrickým tahem

CT tělesa byla dále použita pro získání  $J$ - $\Delta a$  křivek pomocí odlehčovací metody jednoho tělesa. Zkoušky byly provedeny na elektronicky řízeném elektromechanickém zkušebním stroji Instron 8862. Průběh zatěžování byl řízen pomocí přídavného snímače rozevření vrubu COD (Crack Opening Displacement), umístěném na zkušebním tělese. Zkušební tělesa se zatěžovala jednotlivými cykly. V oblasti plastických deformací se ze změny směrnice lineární části odlehčení stanovila poddajnost  $C$ . V cyklu, kde došlo k její výrazné změně, byl určen začátek stabilního šíření trhliny.

#### 4.3.5. Měření tvrdosti a mikrotvrdosti

Zkoušky tvrdosti dle Brinella a mikrotvrdosti dle Vickerse byly realizovány v mechanické laboratoři společnosti ZETOR TRACTORS, a.s. na zkušebních strojích VEB a Mitutoyo MVK. Na stejném pracovišti byl naměřen průběh mikrotvrdosti ve svarovém spoji plech/plech v souladu se standartem ČSN EN ISO 9015-2 [13].

#### **4.3.6. Metalografická analýza**

Předmětem metalografické analýzy byly oba základní materiály, jejich tepelně ovlivněné zóny, a přechodové oblasti, tzn. oblasti na rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu, kde došlo k natavení svařovaných materiálů. Byl také vyhodnocen samotný svarový kov. Kvalitativně byla vyhodnocena mikročistota všech použitých materiálů. Vyhodnocena byla rovněž velikost zrna podle normy ČSN 42 0462 [14]. Metalografická analýza byla realizována v laboratořích společnosti ZETOR TRACTORS, a.s. na světelném mikroskopu Leica DM ILM.

## 5. Výsledky provedených zkoušek

### 5.1. Výsledky chemické analýzy

Dodané vzorky byly podrobeny spektrální chemické analýze. Výsledky chemické analýzy jak základních materiálů (litého a tvářeného), tak svarového kovu jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Chemická analýza. Obsah prvků v hmotnostních procentech

Vzorek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
Tvářený	0,11	0,31	0,49	0,011	0,040	0,03	0,01	0,03	0,019	0,12
Litý	0,22	0,38	0,61	0,032	0,020	0,20	0,02	0,13	0,026	0,24
Svar	0,04	0,46	0,68	0,019	0,022	0,04	0,01	0,04	<0,002	0,16

Jak litá, tak tvářená ocel obsahuje málo dezoxidačních prvků. Obsahuje v obou případech kolem 0,5 % manganu. Ten má schopnost vázat velké množství síry. Protože té je zejména u tvářeného vzorku velké množství, dá se v oceli očekávat množství sulfidů manganu. Protože je v obou případech také přítomno malé množství hliníku, bude se jednat spíše o kulovité vměstky, rovnoměrně roztroušené v oceli. V případě tvářeného materiálu budou tyto tvárné vměsky protaženy ve směru válcování. Důležitá je také vysoká hodnota fosforu u litého materiálu, který segreguje z taveniny a mimo jiné snižuje houževnatost oceli.

### 5.2. Výsledky zkoušek tahem

Hodnoty základních mechanických charakteristik, zjištěných zkouškou tahem, jsou uvedeny v tab. 3. Příslušné tahové diagramy jsou uvedeny na obr. I.1 až I.7 v Příloze I. V několika případech nebylo možné určit kontrakci, protože v průběhu zkoušky došlo k vytvoření krčku na obou koncích měřené délky. Svar zřejmě nebyl obsažen v celé měrné délce vzorku a zkouška byla ovlivněna nižšími pevnostními vlastnostmi tepelně ovlivněné zóny na obou koncích zkušebního tělesa.

Tab. 3 Základní materiálové charakteristiky

<b>Základní tvářený materiál ze svaru plech/plech</b>							
<b>Vzorek č.</b>	<b>Teplota</b>	<b><math>d_0</math> [mm]</b>	<b><math>R_{eL}</math> [MPa]</b>	<b><math>R_{eH}</math> [MPa]</b>	<b><math>R_m</math> [MPa]</b>	<b>A [%]</b>	<b>Z [%]</b>
<b>BK 31</b>	RT	6,007	239,60	293,73	378,91	47,8	72,5
<b>BH 34</b>	RT	6,004	244,60	257,25	380,92	43,4	73,0
<b>BK 36</b>	0°C	6,012	254,28	302,59	392,96	43,9	71,8
<b>BH 31</b>	0°C	6,001	257,89	302,43	398,16	44,7	72,0
<b>Základní tvářený materiál ze svaru plech/odlitek</b>							
<b>Vzorek č.</b>	<b>Teplota</b>	<b><math>d_0</math> [mm]</b>	<b><math>R_{eL}</math> [MPa]</b>	<b><math>R_{eH}</math> [MPa]</b>	<b><math>R_m</math> [MPa]</b>	<b>A [%]</b>	<b>Z [%]</b>
<b>JK 11</b>	RT	5,998	229,55	261,13	380,03	44,3	72,5
<b>JH 12</b>	RT	6,005	234,48	252,68	380,57	45,6	74
<b>JH 13</b>	0°C	5,997	245,34	308,82	396,40	42,1	73,8
<b>JK 12</b>	0°C	5,999	244,01	288,70	397,16	45,6	73
<b>Základní litý materiál</b>							
<b>Vzorek č.</b>	<b>Teplota</b>	<b><math>d_0</math> [mm]</b>	<b><math>R_{eL}</math> [MPa]</b>	<b><math>R_{eH}</math> [MPa]</b>	<b><math>R_m</math> [MPa]</b>	<b>A [%]</b>	<b>Z [%]</b>
<b>H 81</b>	RT	6,000	245,37	285,30	456,02	23,0	46,3
<b>K 14</b>	RT	6,003	249,26	255,62	474,71	31,9	49,5
<b>H 83</b>	0°C	5,997	255,79	298,83	490,61	29,5	38,9
<b>K 11</b>	0°C	6,007	263,35	281,67	492,16	12,4	16,6
<b>Tepelně ovlivněná zóna svaru plech/plech</b>							
<b>Vzorek č.</b>	<b>Teplota</b>	<b><math>d_0</math> [mm]</b>	<b><math>R_{eL}</math> [MPa]</b>	<b><math>R_{eH}</math> [MPa]</b>	<b><math>R_m</math> [MPa]</b>	<b>A [%]</b>	<b>Z [%]</b>
<b>CH 102</b>	RT	6,000	248,19	253,61	381,34	43,2	72,2
<b>CK 106</b>	RT	6,009	-	-	380,30	41,4	71,3
<b>CK 110</b>	0°C	5,999	252,16	272,72	397,07	41,7	70,9
<b>CH 106</b>	0°C	5,992	-	-	398,86	35,6	71,1
<b>Tepelně ovlivněná zóna odlitku svaru plech/odlitek</b>							
<b>Vzorek č.</b>	<b>Teplota</b>	<b><math>d_0</math> [mm]</b>	<b><math>R_{eL}</math> [MPa]</b>	<b><math>R_{eH}</math> [MPa]</b>	<b><math>R_m</math> [MPa]</b>	<b>A [%]</b>	<b>Z [%]</b>
<b>H 21</b>	RT	5,999	249,44	251,81	465,06	25,7	39,4
<b>H 51</b>	RT	6,002	249,78	264,54	470,21	27,6	49,4
<b>H 23</b>	0°C	6,001	258,08	267,08	482,21	21,4	29,8
<b>H 52</b>	0°C	6,003	258,16	302,90	489,18	25,9	45,7
<b>Svar plech/plech</b>							
<b>Vzorek č.</b>	<b>Teplota</b>	<b><math>d_0</math> [mm]</b>	<b><math>R_{eL}</math> [MPa]</b>	<b><math>R_{eH}</math> [MPa]</b>	<b><math>R_m</math> [MPa]</b>	<b>A [%]</b>	<b>Z [%]</b>
<b>DK 101</b>	RT	6,004	247,67	270,98	392,05	23,1	-
<b>DH 105</b>	RT	6,000	254,61	284,63	389,26	24,0	-
<b>DH 110</b>	0°C	5,994	268,27	285,86	403,26	19,3	-
<b>DK 105</b>	0°C	6,007	265,46	282,03	409,66	22,0	-
<b>Svar plech /odlitek</b>							
<b>Vzorek č.</b>	<b>Teplota</b>	<b><math>d_0</math> [mm]</b>	<b><math>R_{eL}</math> [MPa]</b>	<b><math>R_{eH}</math> [MPa]</b>	<b><math>R_m</math> [MPa]</b>	<b>A [%]</b>	<b>Z [%]</b>
<b>JH 1</b>	RT	5,994	252,87	260,52	397,26	16,6	72,3
<b>JK 2</b>	RT	5,997	253,38	288,78	402,47	10,7	-
<b>JK 3</b>	0°C	5,992	345,09	348,24	424,72	6,6	-
<b>JH 2</b>	0°C	5,995	259,75	281,98	417,21	17,8	72,5



### 5.3. Kvazistatické zkoušky CT těles excentrickým tahem

První provedenou zkouškou byl test tří CT těles pro zjištění lomového chování za snížených teplot. Záznam experimentu ve tvaru závislosti síla-rozevření vrubu je uveden na obr. II.1 v Příloze II. Všechna tělesa vykazovala výrazné tvárné chování. Při dosažení maximálního rozevření snímače 4 mm nebylo dosaženo maxima zátěžné síly.

Rozdíl v chování základního tvářeného materiálu a tepelně ovlivněné zóny tvářeného materiálu není při zkoušení při teplotě 0 °C příliš patrný.

### 5.4. Určení $J$ - $\Delta a$ křivek

Na základě skutečností uvedených v předcházejícím odstavci bylo rozhodnuto realizovat další zkoušky metodou konstrukce  $J$ - $\Delta a$  křivek. Zkušební tělesa byla vyrobena ze svaru plechů, tepelně ovlivněné zóny a základního materiálu. Testy byly prováděny při teplotě 0 °C a při pokojové teplotě. Pro každou teplotu a typ materiálu bylo zkoušeno jedno těleso. Během testu byla zaznamenávána velikost zatěžovací síly, posuv příčnicku a rozevření snímače COD.

Měření probíhala nejprve při teplotě 0 °C. Díky vysoké plasticitě materiálu ovšem došlo k šíření trhliny ve vzorcích až při větším rozevření. Proto nebyl naměřen dostatečný počet cyklů pro získání platné  $J$ - $\Delta a$  křivky. Při měřeních za pokojové teploty byl zvýšen počet odlehčovacích cyklů. Postup určování  $J$ -integrálu a určování  $J$ - $\Delta a$  křivek byl popsán v teoretické části práce. Počáteční délka a konečná délka trhliny byla změřena světelným mikroskopem po vyžhání a rozlomení těles. Okamžik iniciace trhliny byl stanoven z potenciometrického záznamu a na základě změny poddajnosti. Přírůstky trhlín byly rovnoměrně rozloženy mezi nulovou a maximální hodnotou natržení. Konečná délka tvářeného natržení byla změřena na dolomených lomových plochách.

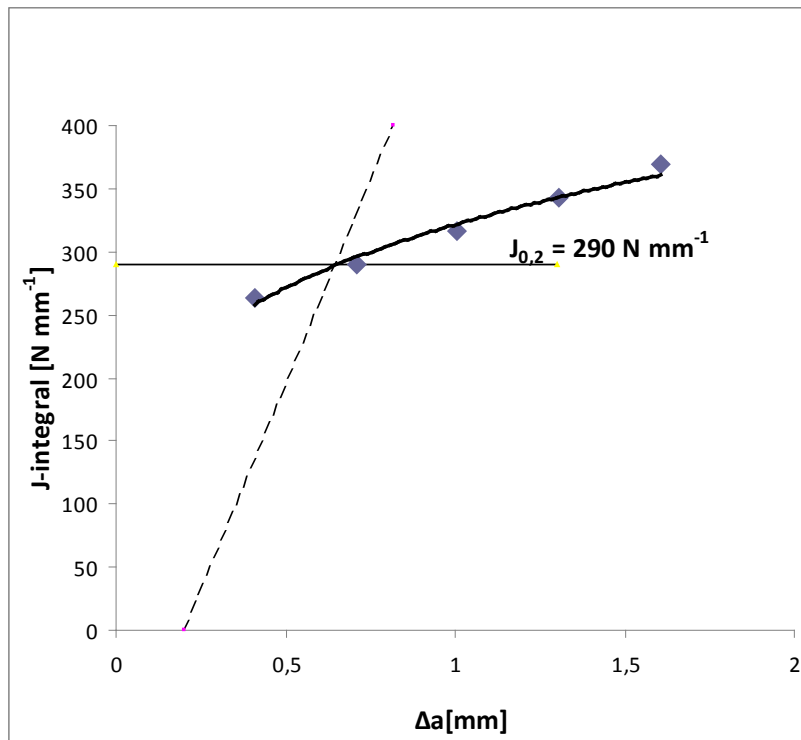
Použité vstupní údaje pro sestavení  $J$ - $\Delta a$  křivek a vypočítané hodnoty  $J_{0,2}$  jsou shrnuty v tab. 4.

Tab. 4 Přehled těles pro zkoušky excentrickým tahem a určení  $J$ - $\Delta a$  křivek

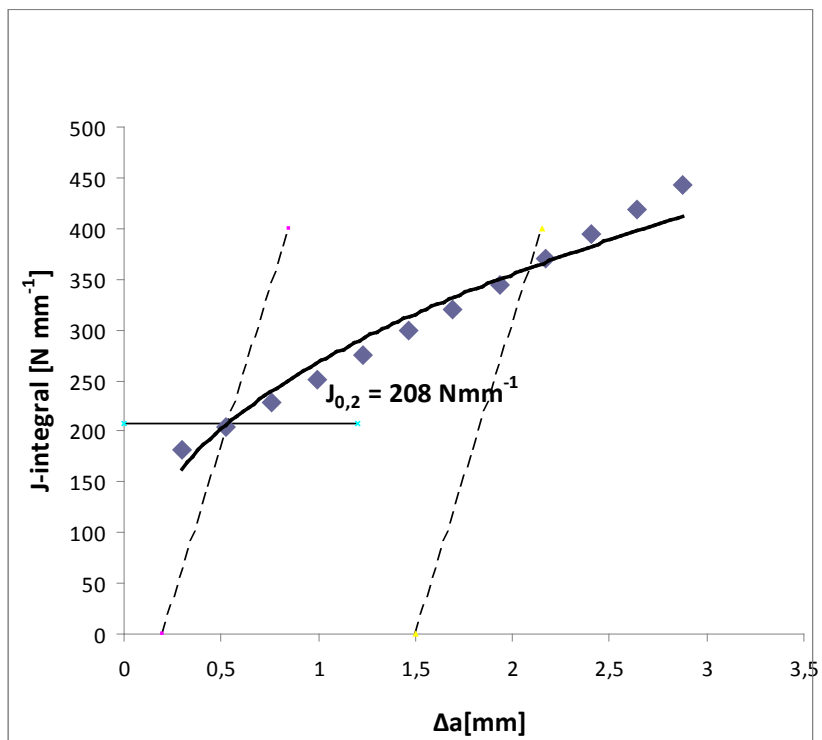
Zkušební těleso		$T$ [°C]	$B$ [mm]	$W$ [mm]	$a_0$ [mm]	$da$ [mm]	$R_e$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$J_{0,2}$ [N.mm <sup>-1</sup> ]
LA 101	ZM	0	25,01	60,02	25,755	1,035	250	395	290
LA 102	ZM	RT	25,00	59,95	25,725	2,153	235	380	208
LH 303	ZM	0	24,99	60,03	26,561	0,683	250	395	295
LH 304	ZM	RT	24,99	60,09	26,372	2,408	235	380	290
LB 201	TOZ	0	24,98	60,09	26,308	1,037	250	405	308
LB 202	TOZ	RT	24,95	60,06	26,439	1,987	250	380	280
LH 201	TOZ	0	25,01	60,06	25,793	0,796	250	405	313
LH 202	TOZ	RT	25,00	60,08	25,788	1,345	250	380	302
LA 200	Svar	0	25,04	60,07	25,928	0,515	265	405	465
LA 202	Svar	RT	25,01	60,09	26,351	1,952	250	390	495

Zatěžovací diagramy zkušebních těles jsou uvedeny na obr. III.1 až obr. III.10 v Příloze III. Výsledné  $J$ - $\Delta a$  křivky jsou uvedeny na obr. 15a až obr. 15j.

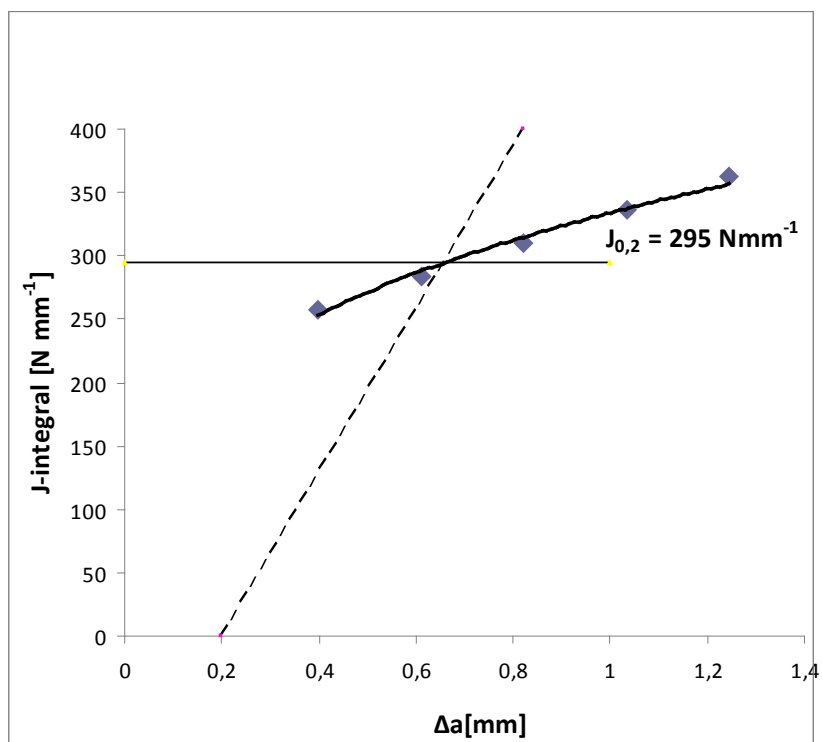
Při provádění zkoušek za teploty 0 °C nebylo dosaženo dostatečného počtu údajů pro platné vyjádření  $J$ - $\Delta a$  křivek. Křivky, uvedené na obrázcích pro zkoušky lomové houževnatosti, provedené při teplotě 0 °C, jsou proto pouze orientační. Dostatečného počtu platných hodnot pro sestavení  $J$ - $\Delta a$  křivek bylo dosaženo za pokojové teploty při zvýšení počtu zatěžovacích cyklů. Houževnatost svaru, vyjádřená hodnotou integrálu  $J_{0,2}$  je výrazně vyšší, než v případech základních materiálů a jejich tepelně ovlivněných oblastí.



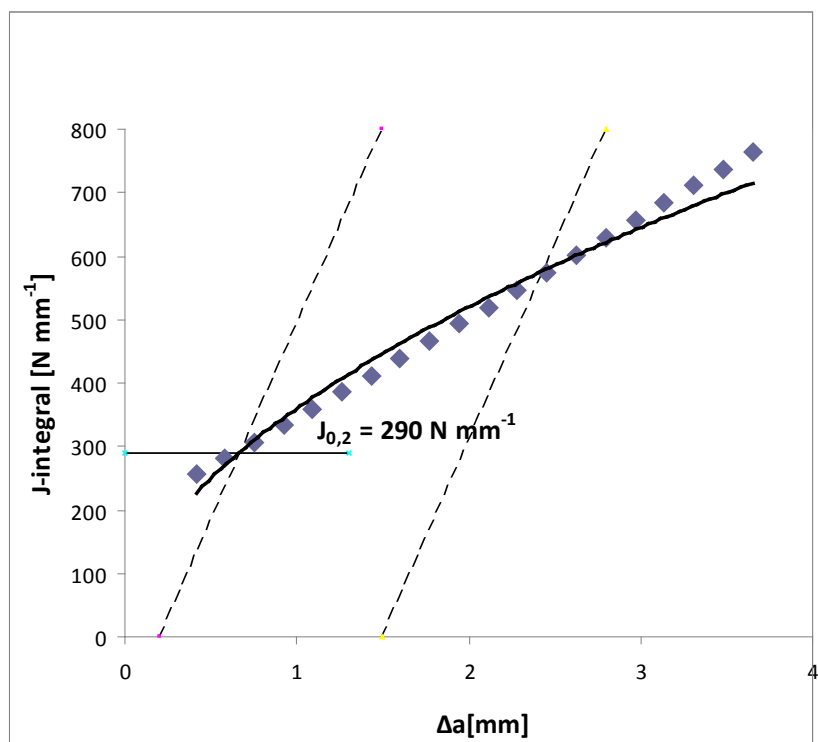
Obr. 15a  $J$ - $\Delta a$  křivka zkušební tělesa LA 101



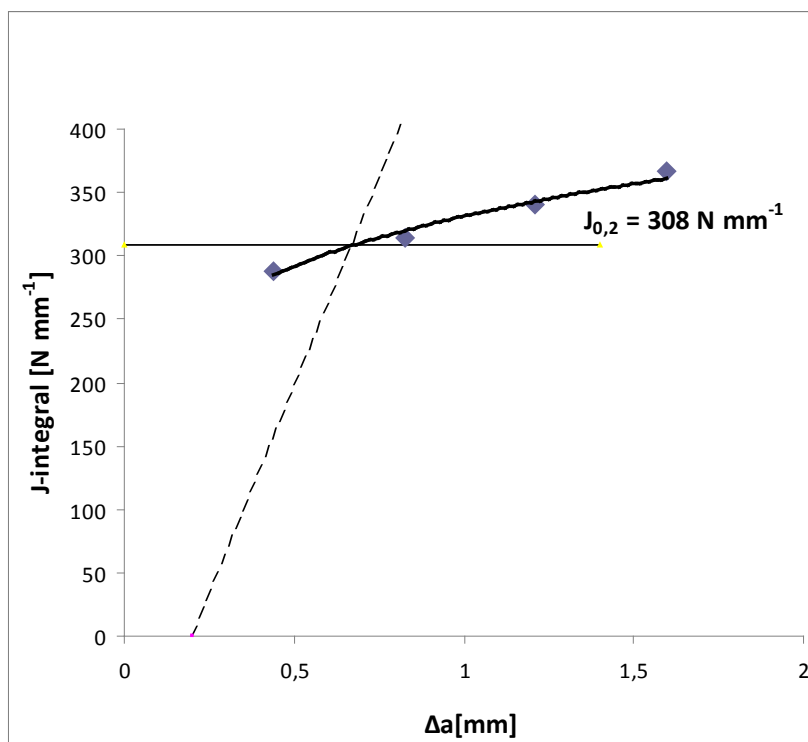
Obr.15a  $J$ - $\Delta a$  křivka zkušební tělesa LA 102



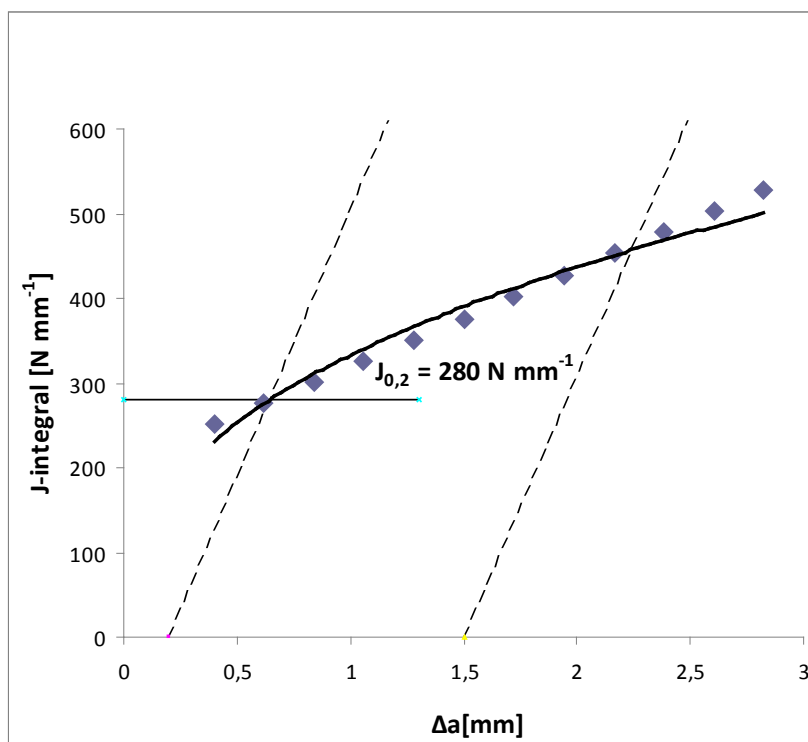
Obr. 15c  $J$ - $\Delta a$  křivka zkušebního tělesa LH 303



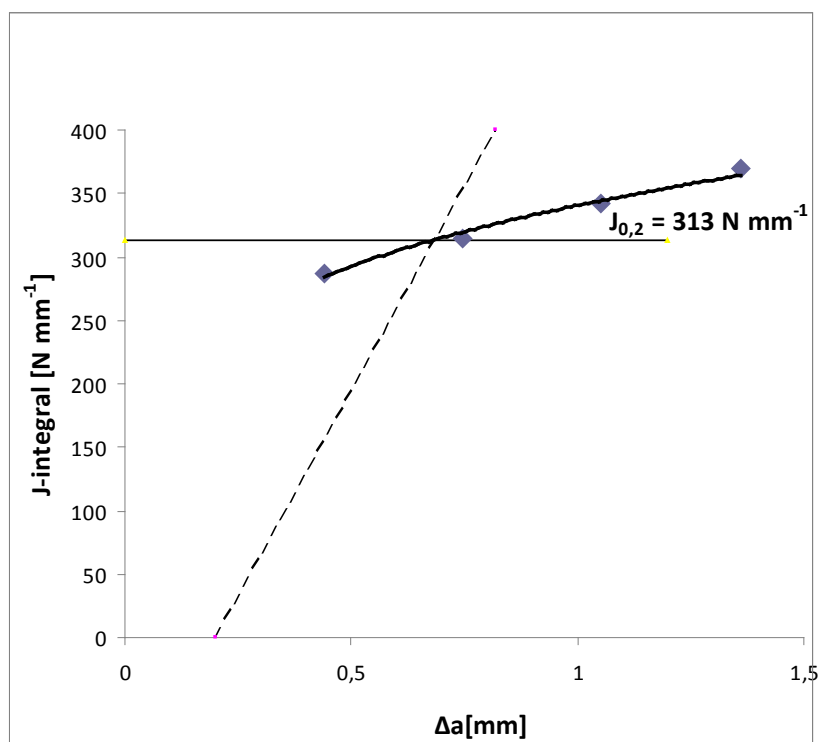
Obr. 15d  $J$ - $\Delta a$  křivka zkušebního tělesa LH 304



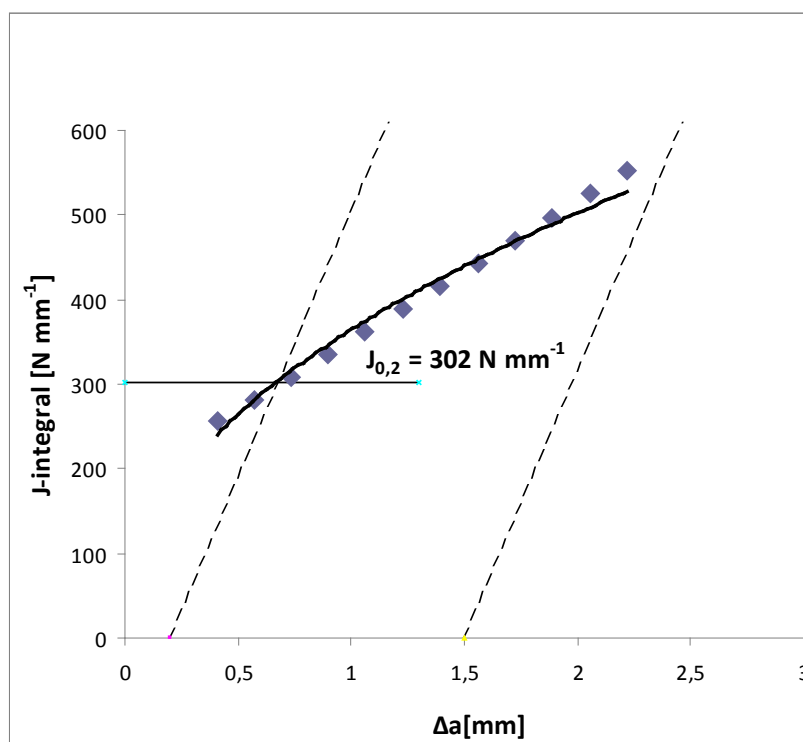
Obr. 15e  $J$ - $\Delta a$  křivka zkušebního tělesa LB 201



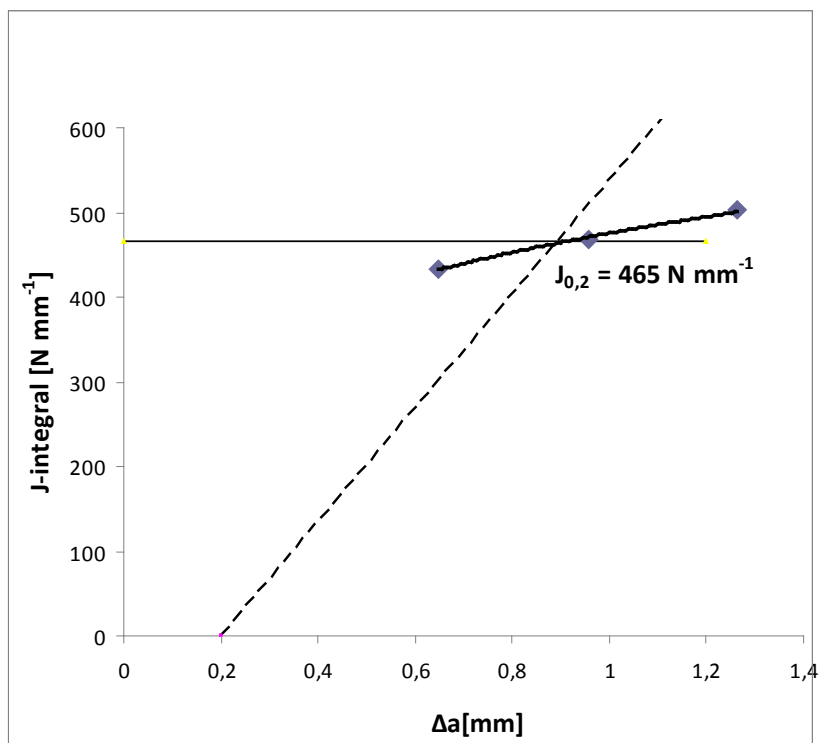
Obr. 15f  $J$ - $\Delta a$  křivka zkušebního tělesa LB 202



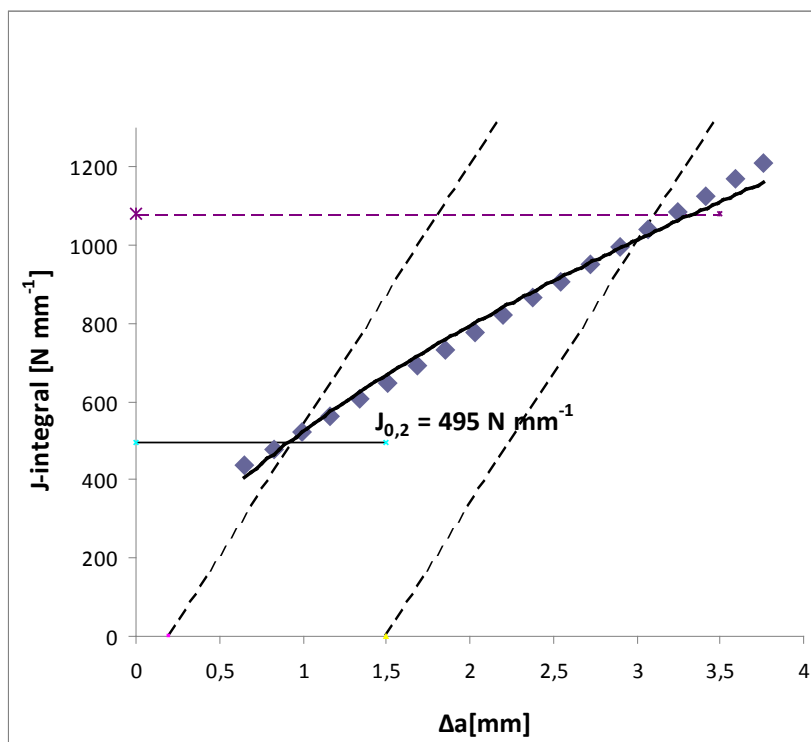
Obr. 15g  $J$ - $\Delta a$  křivka zkušebního tělesa LH 201



Obr. 15h  $J$ - $\Delta a$  křivka zkušebního tělesa LH 202



Obr. 15i  $J$ - $\Delta a$  křivka zkušebního tělesa LA 200



Obr. 15j  $J$ - $\Delta a$  křivka zkušebního tělesa LA 202

### 5.5. Výsledky měření tvrdosti a mikrotvrdosti

Na odebraném výřezu ze segmentu spirály a vnitřní lité části byly provedeny zkoušky tvrdosti HBW 10/3000 a zkoušky mikrotvrdosti HV 1. Výsledky měření tvrdosti základních materiálů jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5 Tvrdost základních materiálů

<b>Tvrdost</b>	<b>Tvářený materiál</b>	<b>Litý materiál</b>
HBW 10/3000	107	135
HV 1	130-132	168-170

Následně byl změřen průběh mikrotvrdosti svaru tvářeného materiálu ve třech řadách v souladu se standardem ČSN EN ISO 9015-2 [13], viz obr. 16.



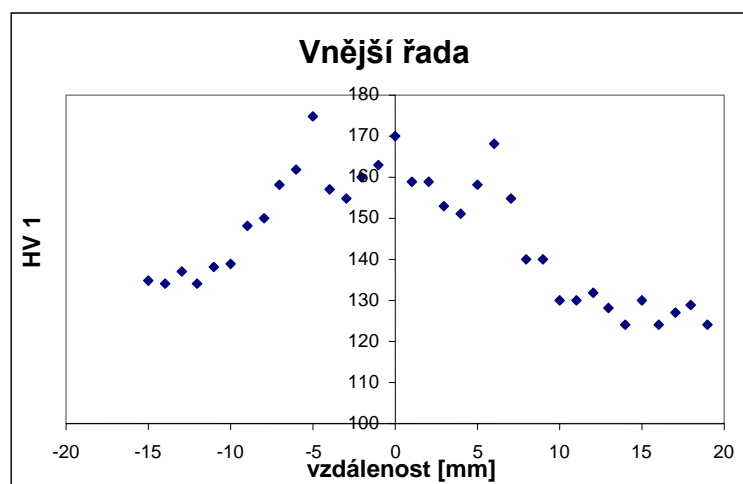
Obr. 16 Umístění řad vtisků ve svaru při měření mikrotvrdosti

Hodnoty mikrotvrdosti jsou vztaženy ke vzdálenosti od pomyslné osy svaru, výsledky jsou uvedeny v tab. 6. Graficky jsou průběhy mikrotvrdosti znázorněny na obr. 17a až obr. 17c.

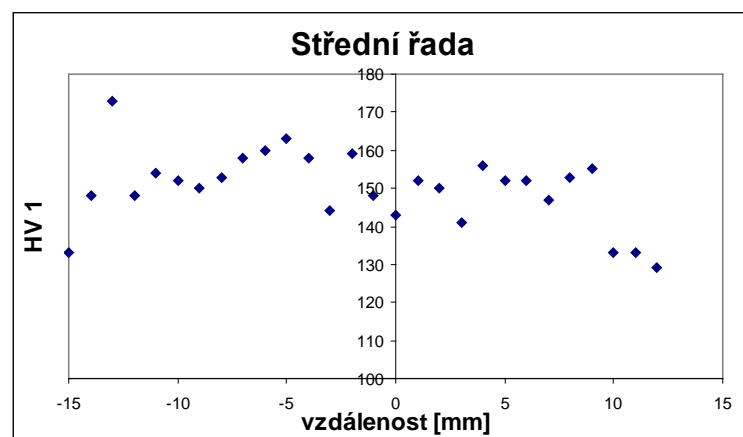


Tab. 6 Hodnoty mikrotvrdosti HV 1 vztažené ke vzdálenosti od osy svaru

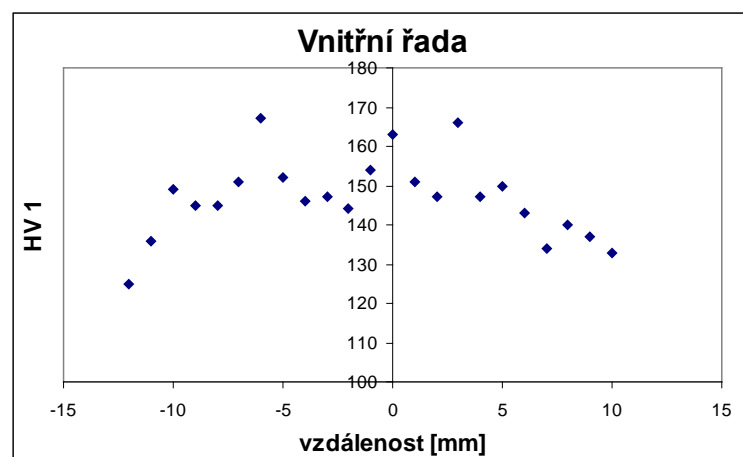
Vzdálenost od osy svaru [mm]	Řada měření tvrdosti HV 1		
	Vnější	Střední	Vnitřní
-16			
-15	135		
-14	134	133	
-13	137	148	
-12	134	173	125
-11	138	148	136
-10	139	154	149
-9	148	152	145
-8	150	150	145
-7	158	153	151
-6	162	158	167
-5	175	160	152
-4	157	163	146
-3	155	158	147
-2	160	144	144
-1	163	159	154
0	170	148	163
1	159	143	151
2	159	152	147
3	153	150	166
4	151	141	147
5	158	156	150
6	168	152	143
7	155	152	134
8	140	147	140
9	140	153	137
10	130	155	133
11	130	133	
12	132	133	
13	128	129	
14	124		
15	130		
16	124		
17	127		
18	129		



Obr. 17a Průběh mikrotvrdosti HV 1 vnější řady vtisků



Obr. 17b Průběh mikrotvrdosti HV 1 střední řady vtisků



Obr. 17c Průběh mikrotvrdosti HV 1 vnitřní řady vtisků

## 5.6. Výsledky metalografické analýzy

Na všech vzorcích, zkoumaných metalografickou analýzou, byla nejprve na nenaleptaných výbrusech kvalitativně vyhodnocena mikročistota. V Příloze IV jsou na snímcích IV.1 a IV.2 ukázány příklady sulfidických a oxidických vměstků v odlitém kovu. Na obr. IV.3 je příklad řediny v litém kovu. Dále jsou na obr. IV.4 a IV.5 znázorněny stejné vměstky ve směru válcování materiálu i ve směru příčném k válcování. Na snímku IV.6 jsou ukázány bubliny ve svarovém materiálu. Ve vyšetřovaných vzorcích byly nalezeny shluky vměstků i větší póry ve svarovém kovu, nebyla však nalezena žádná trhлина nebo neprovařený kov.

Na dalších snímcích v Příloze IV jsou uvedeny struktury základních materiálů, tepelně ovlivněných oblastí, přechodových zón a struktura svarového kovu. Na základě normy ČSN 42 0462 [14] byla vyhodnocena velikost zrna srovnávací metodou, kde se velikost zrna vyjadřuje od stupně 1, velmi hrubého zrna, do stupně 10, velmi jemného zrna. V tepelně ovlivněných oblastech nedošlo k nárůstu velikosti zrna. Ve tvářeném materiálu jej lze charakterizovat stupněm 8, v litém materiálu lze hrubost zrna vyjádřit stupněm 5. Přechodové oblasti jsou úzké, svar je koherentní. Ve svarovém kovu je vidět lokální zhrubnutí zrna, způsobené postupným pokládáním housenek. Velikost zrna ve svaru lze vyjádřit číslem 10, místy 8. V těchto hrubších místech feritické zrno ojediněle tvořilo dendritickou strukturu.

Struktura tvářeného materiálu a svarového kovu je feritická, struktura litého materiálu je feriticko-perlitická. Perlit je velmi jemný.

Síra byla dobře vyvázána ve vměstcích, fosfidické eutektikum bylo rovnoměrně rozloženo ve struktuře materiálu.

## 6. Diskuze výsledků

Metalografická analýza potvrdila, že mangan, obsažený v oceli spolehlivě vyvázal síru na dobře tvárné sulfidické a oxidicko-sulfidické vměstky. V případě litého materiálu s vyšším obsahem fosforu nedošlo k jeho segregování na hranicích zrn. V materiálu tedy z tohoto hlediska nedojde ke křehkému lomu či šíření trhliny v takových místech.

Základní tvářený materiál vykazoval ve všech případech výraznou mez kluzu. Při zkouškách za snížené teploty byl nárůst meze kluzu značný, meze pevnosti méně výrazný. Hodnoty dolní a horní meze kluzu jsou dost rozdílné. Znamená to, že v materiálu došlo k procesu stárnutí, což je při svařování běžný jev. Jeho tažnost je však díky malé velikosti zrna a jeho feritické struktuře přesto značná. Tvářený materiál je také velmi houževnatý.

Tepelně ovlivněná zóna tvářeného materiálu nevykazuje tak výraznou mez kluzu jako základní materiál. Mez pevnosti, prodloužení a kontrakce jsou srovnatelné se základním tvářeným materiálem. Srovnatelná je také jeho lomová houževnatost. K rekrytalizaci zrna tepelným účinkem svařování nedošlo, velikost zrna je srovnatelná se základním materiálem.

V přechodové oblasti svaru tvářeného materiálu nedošlo ke zhrubnutí feritického zrna ani ke změně jeho morfologie. V přechodové oblasti svaru odlitku se zjemnilo feritické zrno.

Základní materiál odlitku vykazoval velké rozdíly v hodnotách mechanických charakteristik, dosažených za různých teplot. Jeho mez kluzu je srovnatelná s mezí kluzu tvářeného materiálu, má však výrazně vyšší mez pevnosti a výrazně nižší prodloužení a kontrakci. Vysoká pevnost a nižší plastické vlastnosti souvisí s vyšším obsahem uhlíku. Struktura litého kovu je proto feriticko-perlitická. Perlit je velmi jemný. Při zkoušce tahem došlo v jednom případě k lomu zkušebního tělesa K 11 při velmi malém prodloužení. K lomu tělesa došlo na metalurgické vadě odlitku.

Ani v tepelně ovlivněné zóně odlitku nedošlo ke zhrubnutí zrna. Jeho struktura je srovnatelná se základním materiálem. Mechanické charakteristiky vykazují podobné rozptyly jako v případě základního litého materiálu.

Pevnost svaru tvářených částí je přibližně o 20 MPa vyšší než pevnost základního materiálu. Tažnost je výrazně nižší než u základního materiálu. Protože však nebyl svarový kov obsažen v celé délce zkušebního tělesa, tažnost byla zkusena chováním tvářených materiálů. Nelze ji proto objektivně hodnotit.

Pevnost svaru plech/odlitek je výrazně nižší než pevnost základního litého materiálu. Bohužel i v tomto případě svarový kov neobsáhl celou délku vzorku.

Svarový kov je velmi jemnozrnný, pouze na některých místech je ferit lokálně zhrublý. Houževnatost svarového kovu je vyšší, než houževnatost základního tvářeného materiálu. Zkušební těleso ze svarového kovu LA 200, zkoušené při teplotě 0 °C, bylo méně houževnaté než těleso LA 202, zkoušené při pokojové teplotě. Trhlina se pravděpodobně šířila v oblasti, kde bylo ve svaru lokálně zhrublé zrno následkem pokládání housenek svarového kovu. Přesto je i v tomto případě lomová houževnatost vyšší, než houževnatost tvářeného materiálu.

Rozdíl tvrdostí ve svařeném materiálu byl demonstrován průběhem mikrotvrdosti svaru. Tvrdost svarového materiálu je vyšší než tvrdost tepelně ovlivněných zón materiálu.

Při zkouškách tahem za teploty 0 °C byly hodnoty meze kluzu a meze pevnosti všech zkoušených materiálů vyšší než za pokojové teploty. S mezí kluzu úzce souvisí i hodnota  $J_{0,2}$  integrálu, určená pro okamžik iniciace stabilní trhliny. Z tohoto důvodu byla hodnota  $J_{0,2}$  integrálu při teplotě 0 °C také vyšší než při pokojové teplotě.

## 7. Závěr

V práci byly studovány mechanické vlastnosti svarových spojů a základních materiálů z vyříznutého segmentu spirály přívodního potrubí vodní turbíny. Výsledky měření poukázaly na uspokojivou kvalitu svaru a použitých základních materiálů. Svarové spoje obsahují relativně málo defektů. V žádném ze zkoumaných materiálů nebyly při metalografické analýze (mimo neprovařená místa a dutiny) nalezeny trhliny, vzniklé následkem svařování, ani trhliny, které by byly iniciované metalurgickou nebo technologickou vadou nebo následkem degradace materiálu.

Svarový kov vykázal velmi dobrou houževnatost, dokonce vyšší, než základní tvářený materiál. Kvalita svarového kovu nebyla podstatně snížena ani následkem postupného přikládání dalších vrstev svarového kovu.

Použitý tvářený materiál má dobré plastické vlastnosti, a to i navzdory tomu, že v něm došlo k vystárnutí, což je ovšem ve svarových spojkách běžný jev. V jeho tepelně ovlivněné zóně nedošlo k podstatnému zhrubnutí zrna, i zde si proto zachoval dobré vlastnosti.

Lze říci, že technologie svařování byla dobře zvládnuta. Zřejmě tomu napomohla masivnost více než 30 mm silné stěny konstrukce, která při svařování plynule odváděla teplo. Nedošlo tak k přílišnému ohřátí tepelně ovlivněných zón.

Kvalita litého materiálu je snížena metalurgickými vadami, vzniklých v průběhu odlévání. Ani na nich však nedošlo k iniciaci nestabilních (štěpných) trhlin. Případný postupný stabilní růst tvárných trhlin v materiálu by však mohl být přes metalurgické vady urychlen.

Na základě naměřených materiálových charakteristik a výsledků chemické a metalografické analýzy se tedy dá říci, že jak svarové spoje plech/plech, tak základní materiál přívodního potrubí vodní turbíny jsou bezpečné. V rozsahu obvyklých pracovních teplot potrubí nebylo pozorováno jiné než tvárné chování všech studovaných materiálů. Druhý, identický exemplář přívodního potrubí může být z tohoto hlediska dále provozován bez zvýšeného rizika vzniku křehkého lomu. Je ovšem nutné podotknout, že předmětem dalších analýz je lomové chování svarů a základních materiálů v oblastech spojů plech/litý materiál. Tato měření a analýzy již nejsou součástí předložené diplomové práce.

## Literatura

- [1] NECHLEBA M.: *Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství*, SNTL, Praha, 1962, 676 s.
- [2] KUNCIPÁL J. et al.: *Teorie svařování*, SNTL, Praha, 1986, 272 s.
- [3] MITURA K., LANDOVÁ S.: *Vměstky v oceli a jejich vliv na užité vlastnosti*, SNTL, Praha, 1986, 160 s.
- [4] ANDERSON, T.: *Fracture mechanics: Fundamentals and applications*, 2. ed. Boca Raton, CRC Press, 1995, 680 s., ISBN 0-8493-4260-0
- [5] HOLZMANN M., JURÁŠEK L.: *Princip koncepce Master křivky, její určování a aplikace*, Konstrukce, 1(2009), s. 68-77
- [6] PLUHAŘ, J. PUŠKÁR A., KOUTSKÝ J., MACEK B., BENEŠ V.: *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*, SNTL/ALFA, Praha, 1987, 418 s.
- [7] VELES, P.: *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*, 2. vyd., Alfa, Bratislava, 1989, 401 s.
- [8] KUNZ J.: *Aplikovaná lomová mechanika*, 4.vyd., ČVUT, Praha, 2005, 272 s., ISBN 80-01-03306-6
- [9] ASTM E 1820 - 01 Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, 2003
- [10] MAN J., HOLZMANN M., VÁLKA L.: *Současný stav normalizace zkoušek lomově-mechanických charakteristik*, Zváranie, 42 (1993), 11, s. 241-248
- [11] *Skúška statickej lomovej húževnatosti zvarových spojov. Odporúčaná metóda skúšania*, VÚZ Bratislava, 1987, 42 s.
- [12] ČSN EN 100002-1 Kovové materiály – Zkouška tahem – Část 1: Zkouška tahem za okolní teploty, 1998.
- [13] ČSN EN ISO 9015-2 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušení tvrdosti – Část 2: Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů, Praha, ÚNMZ, 2011
- [14] ČSN 42 0462 Stanovení velikosti zrna ocelí a neželezných kovů, Praha, ÚNM, 1983

## Použité zkratky a symboly

$E$	modul pružnosti v tahu	MPa
$a$	délka trhliny	m
$a_0$	počáteční délka trhliny	m
$da, \Delta a$	přírůstek délky trhliny	m
$F$	síla	N
$A$	Práce vnějších sil	J
$B$	tloušťka zkušebního tělesa	m
$W$	šířka zkušebního tělesa	m
$C$	poddajnost	m.N <sup>-1</sup>
$\gamma$	měrná povrchová energie materiálu	J
$W$	celková energie systému	J
$\sigma$	napětí	MPa
$R$	odpor materiálu vůči šíření trhliny	J.m
$G$	hnací síla trhliny	MN.m <sup>-1</sup>
	rychlost uvolňování energie	MJ.m <sup>-2</sup>
$K$	součinitel intenzity napětí	MPa.m <sup>1/2</sup>
$K_{IC}$	lomová houževnatost při vzniku nestabilního křehkého lomu při zachování podmínek rovinné deformace	MPa.m <sup>1/2</sup>
$K_C$	lomová houževnatost při převážně lineárně-elastické deformaci zkušebního tělesa do vzniku nestabilního lomu. Není splněna podmínka rovinné deformace	MPa.m <sup>1/2</sup>
$K_{JC}$	lomová houževnatost přepočtená z kritických hodnot $J$ -integrálu stanovená pro okamžik iniciace nestabilního lomu	MPa.m <sup>1/2</sup>
$K_{J0,2}$	lomová houževnatost přepočtená z hodnoty $J_{0,2}$ integrálu pro okamžik iniciace růstu stabilní trhliny	MPa.m <sup>1/2</sup>
$K_{Jm}$	lomová houževnatost určená pro okamžik maximální síly $F_m$	MPa.m <sup>1/2</sup>
$K_{Ju}$	lomová houževnatost přepočtená z $J_u$ integrálu pro okamžik iniciace nestabilního křehkého lomu po krátkém tvárném růstu trhliny u kořene původní trhliny	MPa.m <sup>1/2</sup>
$J_{0,2}$	hodnota $J$ -integrálu stanovená pro okamžik iniciace růstu stabilní trhliny ( $\Delta a = 2$ mm)	N.mm <sup>-1</sup>
$Y$	tvárová funkce součinitele intenzity napětí	-
$R_e$	mez kluzu u tahové zkoušky	MPa
$R_{eL}$	dolní mez kluzu	MPa
$R_{eH}$	horní mez kluzu	MPa
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	MPa
$A$	tažnost	%
$Z$	kontrakce, zúžení	%
$T$	teplota	°C
$t_{DBU}$	horní hranice teploty, při níž nastává nestabilní lom u čela původní nacyklované trhliny	°C
$t_{DBL}$	spodní hranice teploty, při níž nastává nestabilní lom u čela původní nacyklované trhliny	°C
$t_B$	tranzitní teplota křehkosti, začátek teplotního intervalu, v němž jsou iniciovány trhliny křehkým lomem přímo před čelem otupené trhliny	°C



$t_c$	teplota, oddělující tranzitní oblast od oblasti spodních prahových hodnot lomové houževnatosti	°C
CTOD	crack-tip opening displacement	m
$v, V$	rozevření vrubu	m
$f$	přemístění síly	m
COD	crack opening displacement	m
$\nu$	Poissonův poměr	-
$\pi$	Ludolfovo číslo	-
$C_1, C_2$	konstanty regresní funkce	-
ZM	základní materiál	-
TOZ	tepelně ovlivněná zóna	-
LELM	lineární elastická lomová mechanika	-
EPLM	elasticko-plastická lomová mechanika	-

## **Použité zkušební stroje a přístroje**

Elektromechanický zkušební stroj	ZWICK Z050
Elektromechanický zkušební stroj	ZWICK 1382
Elektromechanický zkušební stroj	Instron 8862
Spektrometr s jiskrovým buzením	SPECTROLAB
Brinellův tvrdoměr	VEB Leipzig
Mikrotrvdoměr	Mitutoyo MVK
Metalografický světelný mikroskop	Leica DM ILM

## Seznam obrázků a tabulek

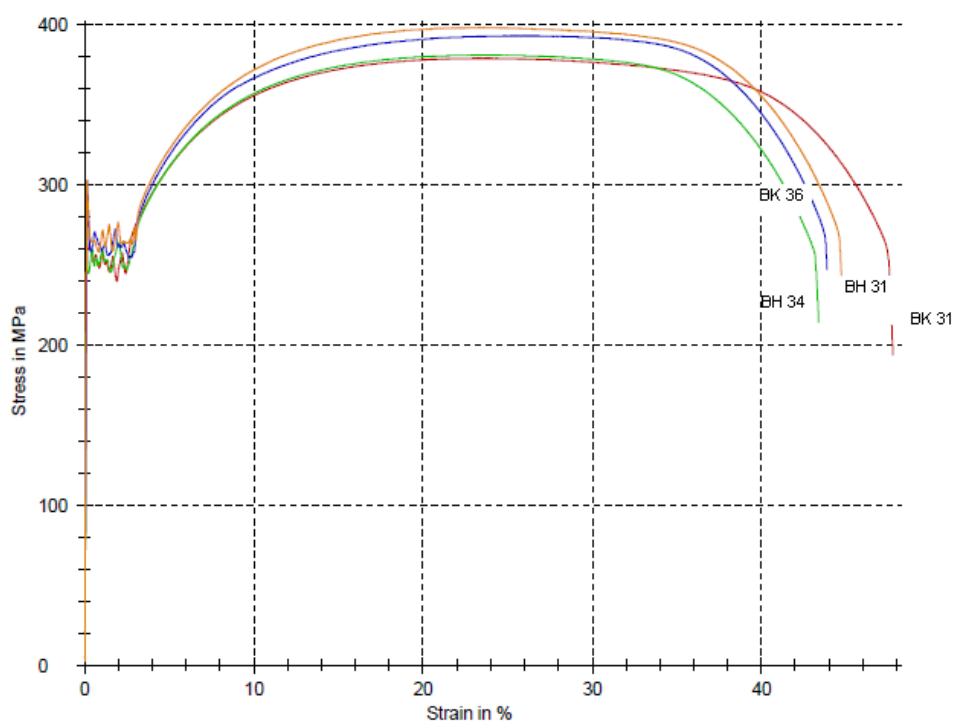
Obr. 1 Vliv tepelného účinku svařování na strukturu svarového spoje .....	4
Obr. 2 Schéma teplotní závislosti lomové houževnatosti .....	7
Obr. 3 Rozdělení $J$ -integrálu na elastickou a plastickou složku práce .....	9
Obr. 4 Zkušební těleso CT .....	10
Obr. 5 Měření délky trhliny na rozlomeném tělese .....	11
Obr. 6 Měření přírůstku délky trhliny $\Delta a$ .....	13
Obr. 7 Záznam síla-přemístění síly při zatěžování a odlehčování zkušebního tělesa.....	13
Obr. 8 Stanovení hodnoty $J_{0,2}$ .....	14
Obr. 9 Schéma spirály přívodního potrubí vodní turbíny .....	17
Obr. 10 Vypreparovaná vada .....	18
Obr. 11 Menší vady v materiálu.....	18
Obr. 12 Schéma umístění jednotlivých typů zkušebních těles.....	19
Obr. 13 Geometrie zkušebních těles pro zkoušku tahem.....	21
Obr. 14 Geometrie použitých CT těles .....	22
Obr. 15a $J$ - $\Delta a$ křivka zkušebního tělesa LA 101 .....	28
Obr. 15b $J$ - $\Delta a$ křivka zkušebního tělesa LA 102 .....	28
Obr. 15c $J$ - $\Delta a$ křivka zkušebního tělesa LH 303 .....	28
Obr. 15d $J$ - $\Delta a$ křivka zkušebního tělesa LH 304.....	28
Obr. 15e $J$ - $\Delta a$ křivka zkušebního tělesa LB 201 .....	30
Obr. 15f $J$ - $\Delta a$ křivka zkušebního tělesa LB 202.....	30
Obr. 15g $J$ - $\Delta a$ křivka zkušebního tělesa LH 201 .....	31
Obr. 15h $J$ - $\Delta a$ křivka zkušebního tělesa LH 202.....	31
Obr. 15i $J$ - $\Delta a$ křivka zkušebního tělesa LA 200.....	32
Obr. 15j $J$ - $\Delta a$ křivka zkušebního tělesa LA 202.....	32
Obr. 16 Umístění řad vtisků ve svaru při měření mikrotvrdosti .....	33
Obr. 17a Průběh mikrotvrdosti HV 1 vnější řady vtisků .....	35
Obr. 17b Průběh mikrotvrdosti HV 1 střední řady vtisků.....	35
Obr. 17c Průběh mikrotvrdosti HV 1 vnitřní řady vtisků .....	35
Tab. 1 Označení použitých vzorků (TOZ-tepelně ovlivněná zóna).....	20
Tab. 2 Chemická analýza. Obsah prvků v hmotnostních procentech .....	24
Tab. 3 Základní materiálové charakteristiky.....	25
Tab. 4 Přehled těles pro zkoušky excentrickým tahem a určení $J$ - $\Delta a$ křivek .....	27
Tab. 5 Tvrdost základních materiálů.....	33
Tab. 6 Hodnoty mikrotvrdosti HV 1 vztahované ke vzdálenosti od osy svaru.....	34

## Seznam příloh

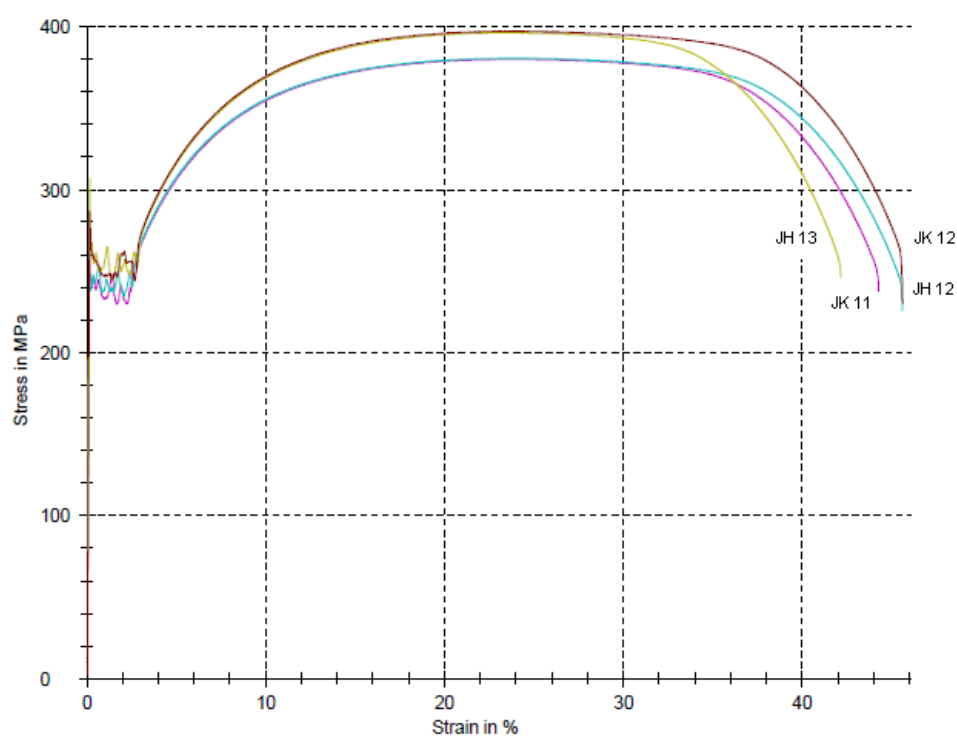
Příloha I	- Tahové křivky	II
Příloha II	- Zkoušky lomové houževnatosti - zatěžovací křivky	VI
Příloha III	- Zkoušky lomové houževnatosti odlehčovací metodou - zatěžovací křivky	VII
Příloha IV	- Metalografická analýza	XII

## **Přílohy**

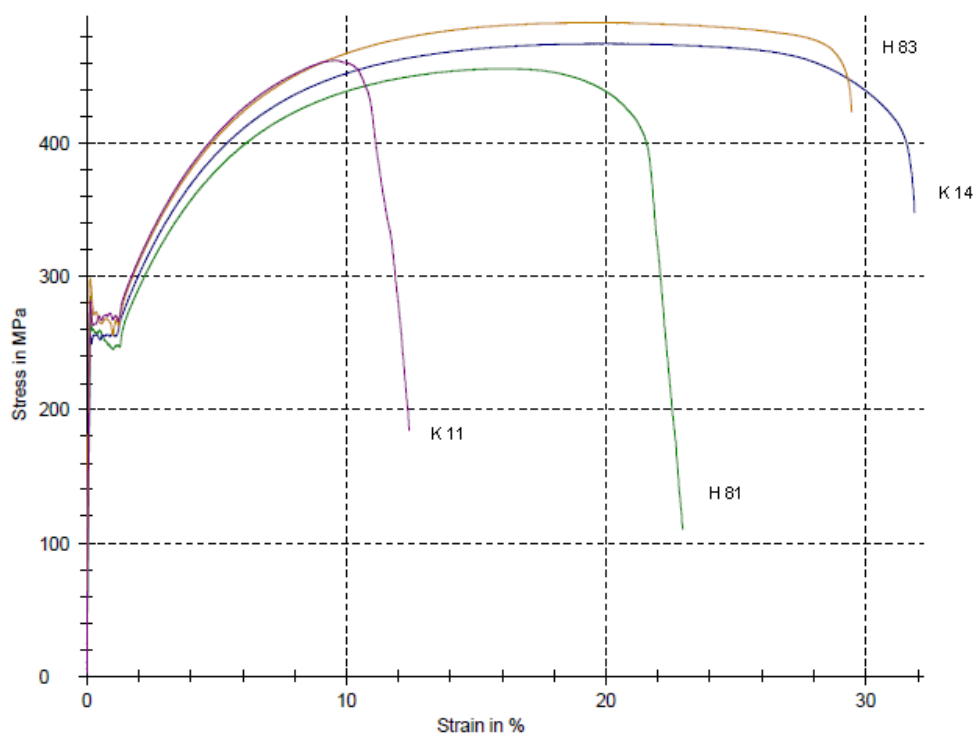
## Příloha I - Tahové křivky



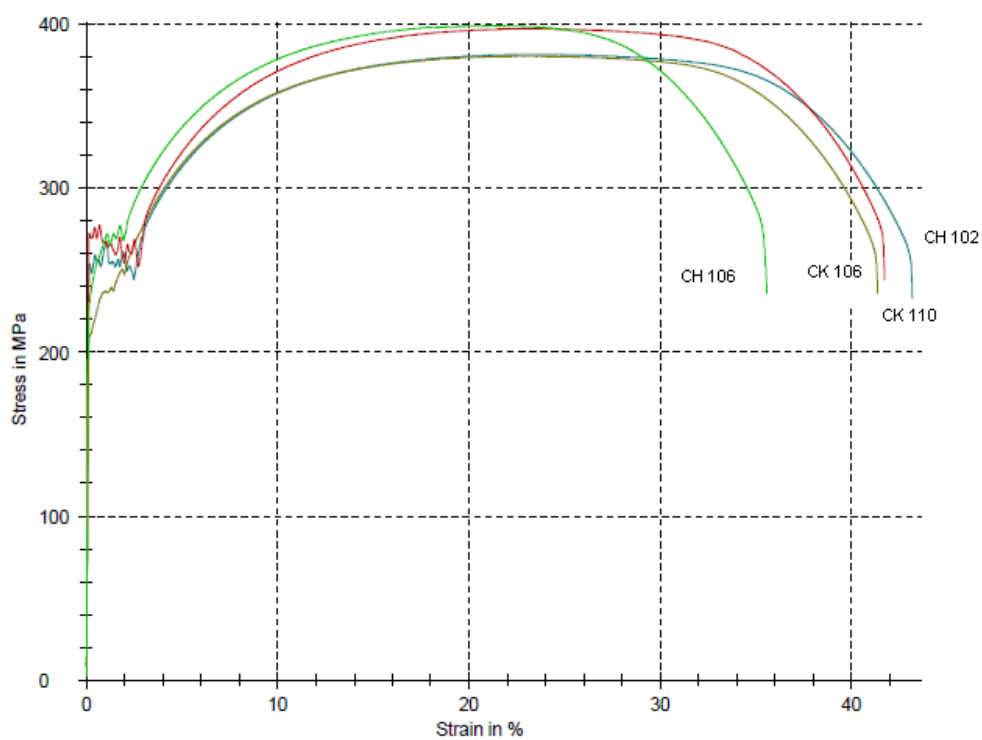
Obr. I.1 Tahové křivky základního tvářeného materiálu ze svaru plech/plech



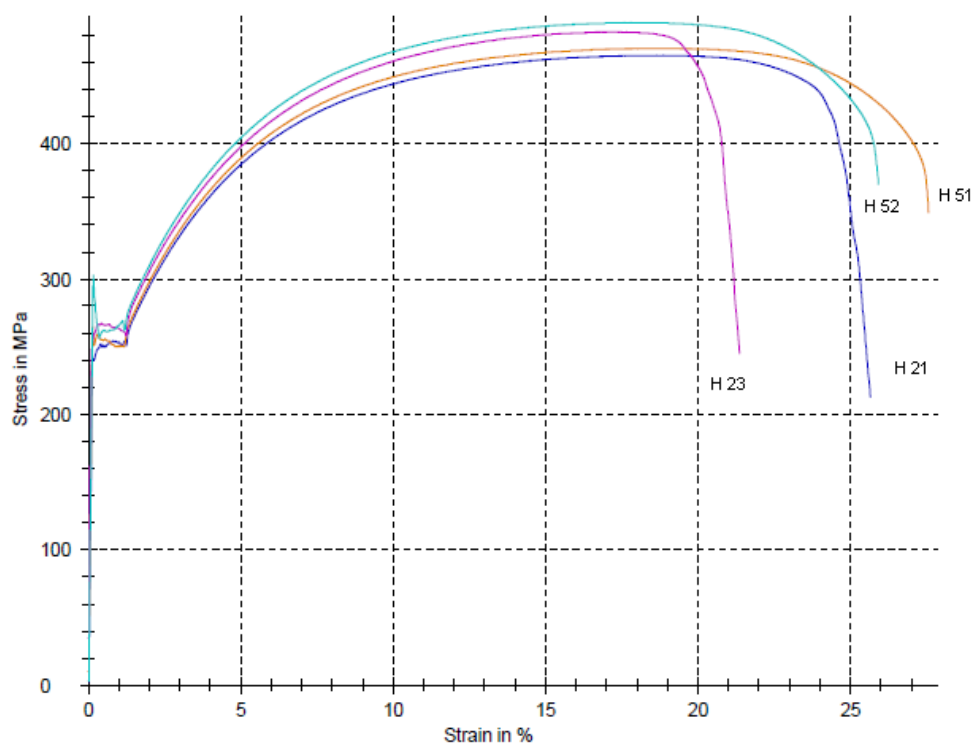
Obr. I.2 Tahové křivky základního tvářeného materiálu svaru plech/odlitek



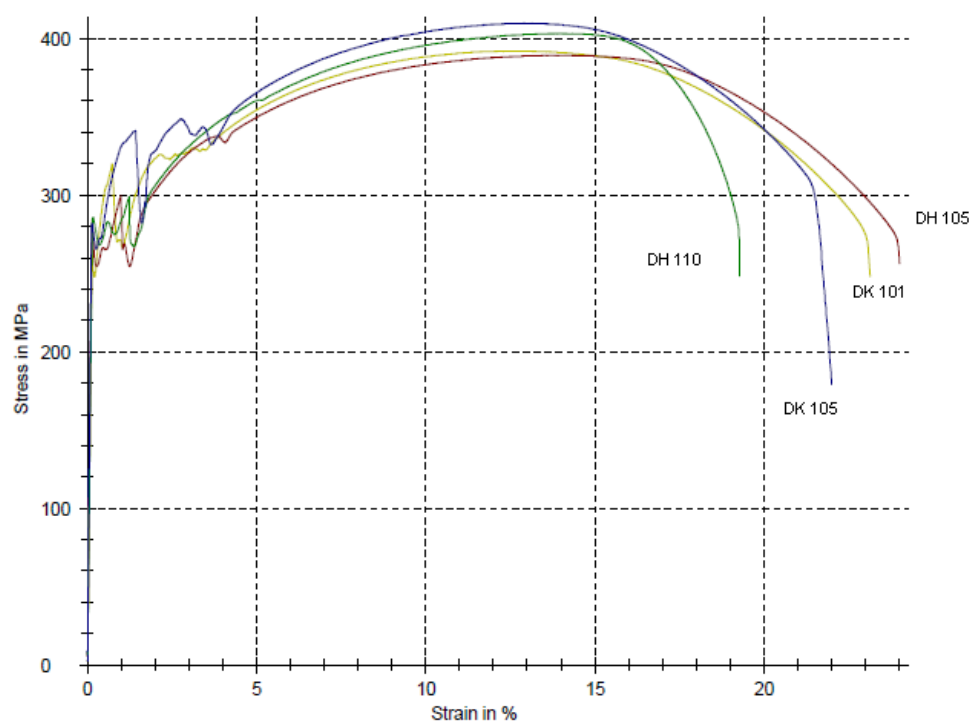
Obr. I.3 Tahové křivky základního litého materiálu



Obr. I.4 Tahové křivky tepelně ovlivněné zóny svarů plech/plech

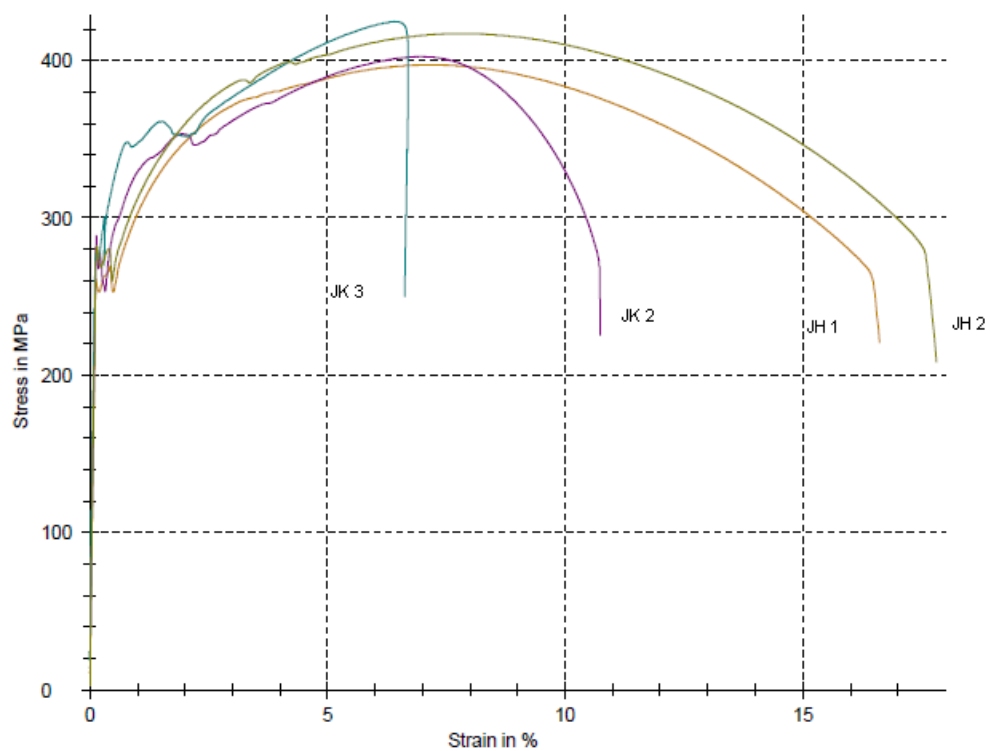


Obr. I.5 Tahové křivky tepelně ovlivněné zóny odlitku na svaru plech/odlitek



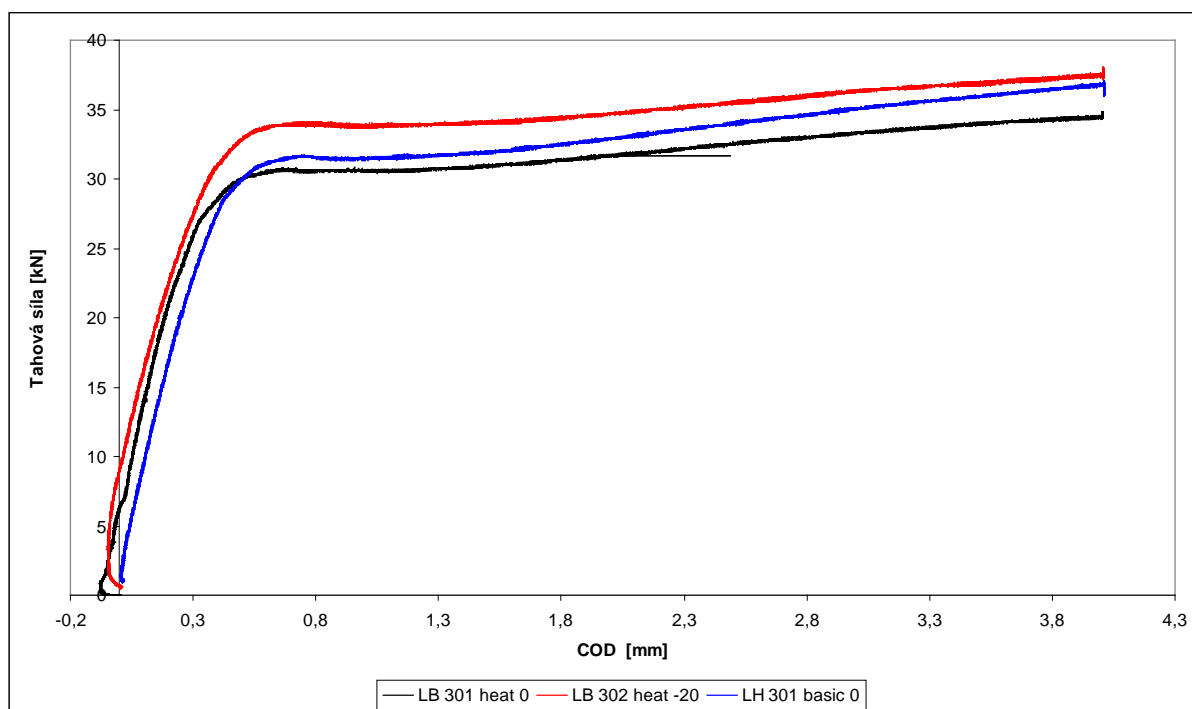
Obr. I.6 Tahové křivky svaru plech/plech





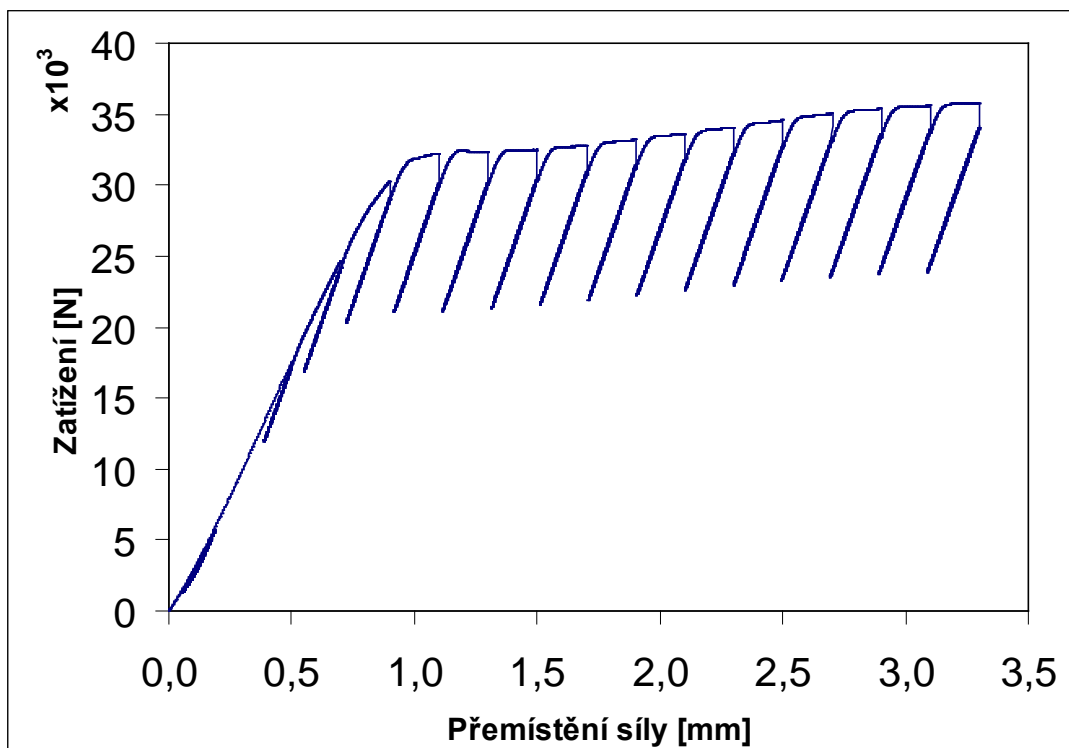
Obr. I.7 Tahové křivky svaru plech/odlitek

## Příloha II - Zkoušky lomové houževnatosti - zatěžovací křivky

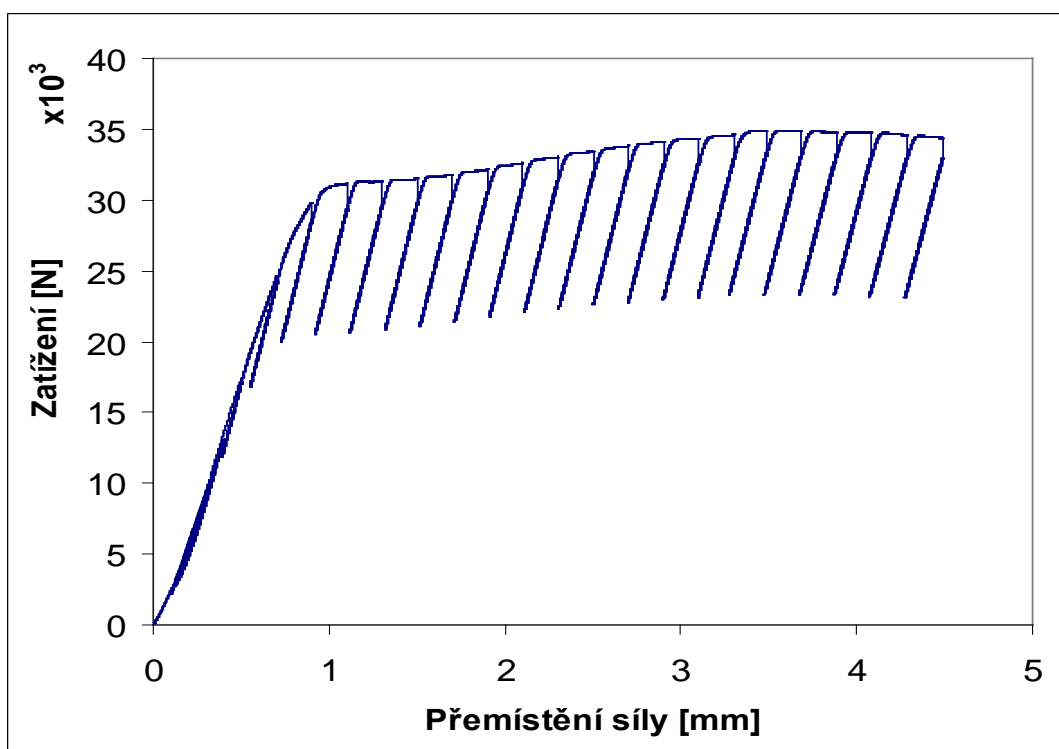


Obr. II.1 Zatěžovací křivky zkoušky lomové houževnatosti. LB 301- tepelně ovlivněná zóna,  $T = 0^{\circ}\text{C}$ ; LB 302 - tepelně ovlivněná zóna,  $T = -20^{\circ}\text{C}$ ; LH 301 -základní materiál,  $T = 0^{\circ}\text{C}$ .

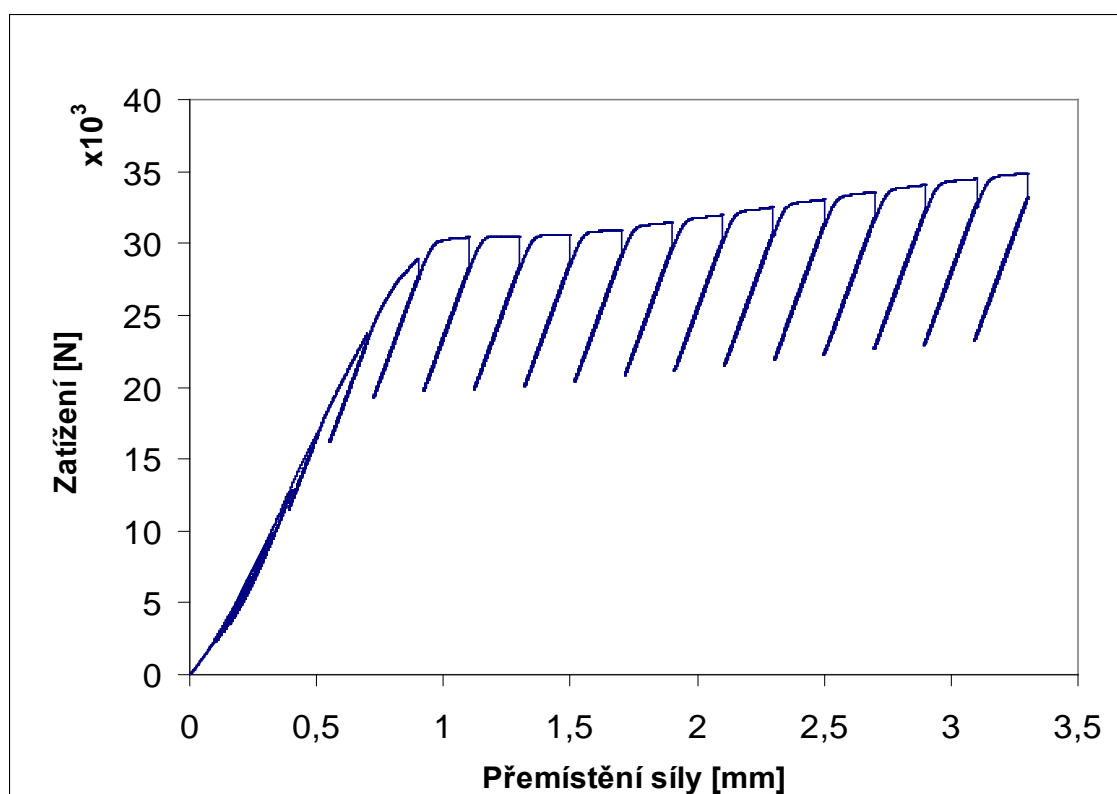
**Příloha III - Zkoušky lomové houževnatosti odlehčovací metodou - zatěžovací křivky**



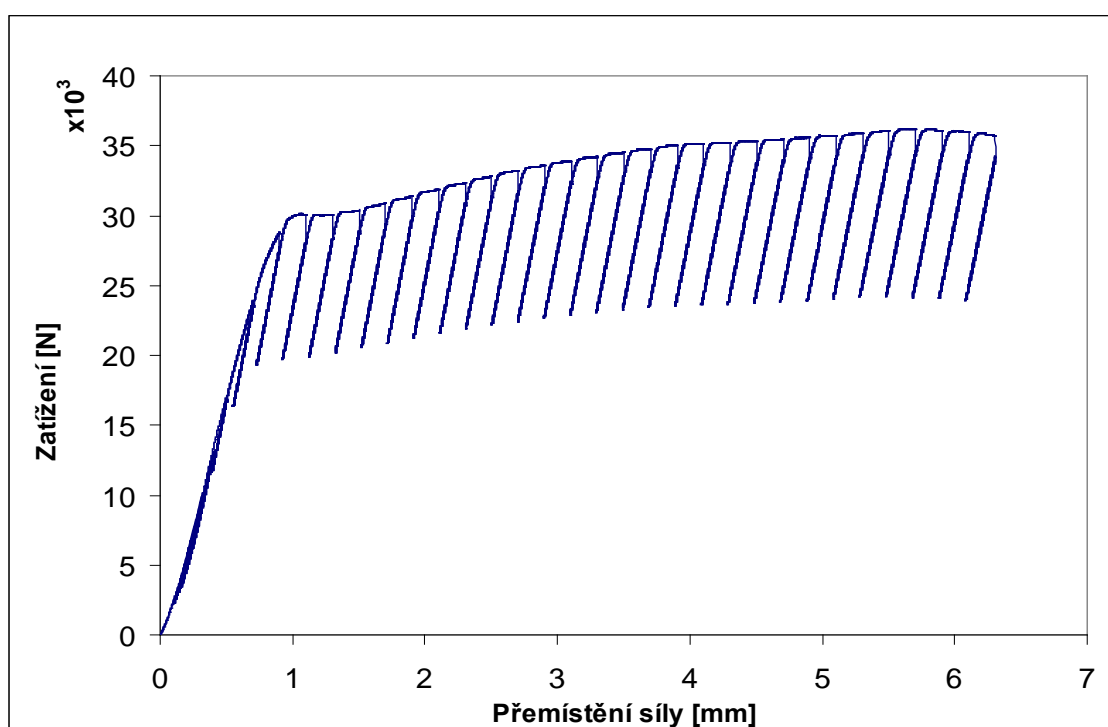
Obr. III.1 Zatěžovací křivka pro zkušební těleso LA 101



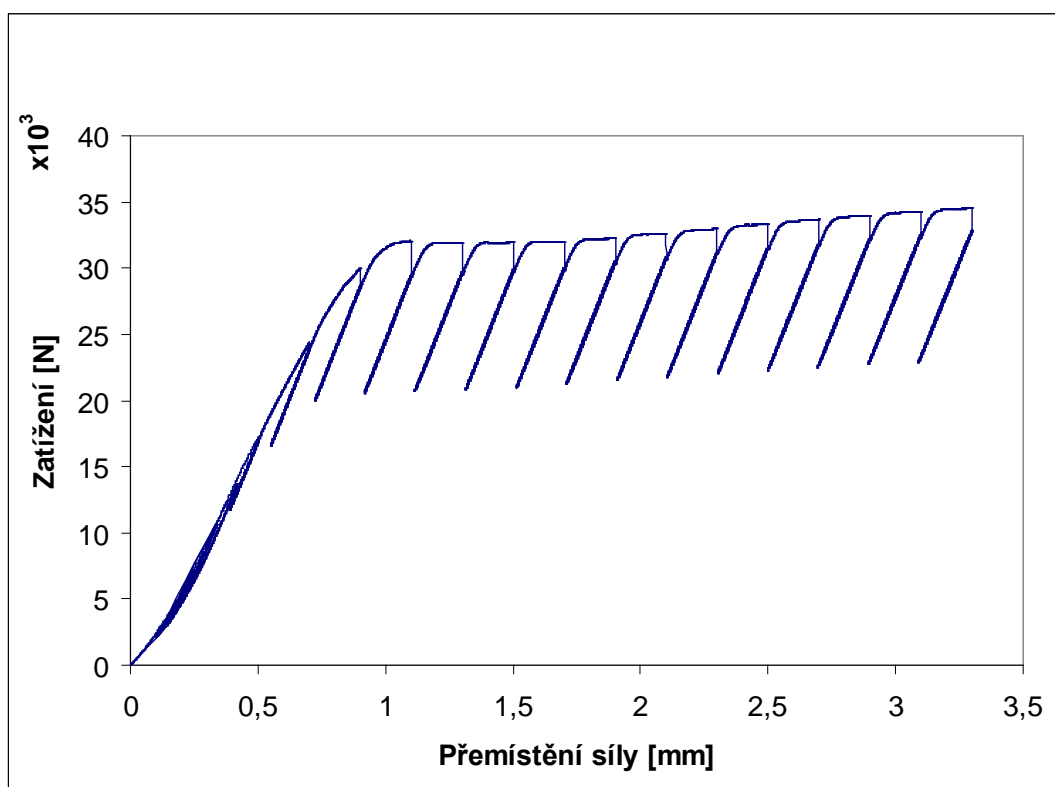
Obr. III.2 Zatěžovací křivka pro zkušební těleso LA 102



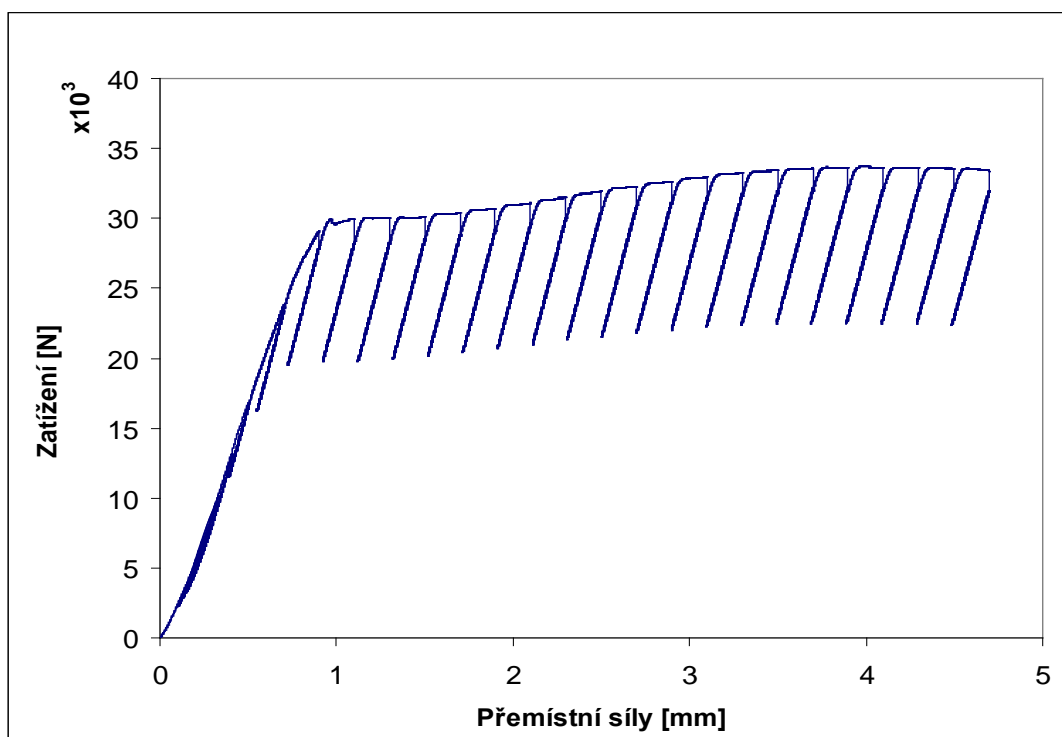
Obr. III.3 Zatěžovací křivka pro zkušební těleso LH 303



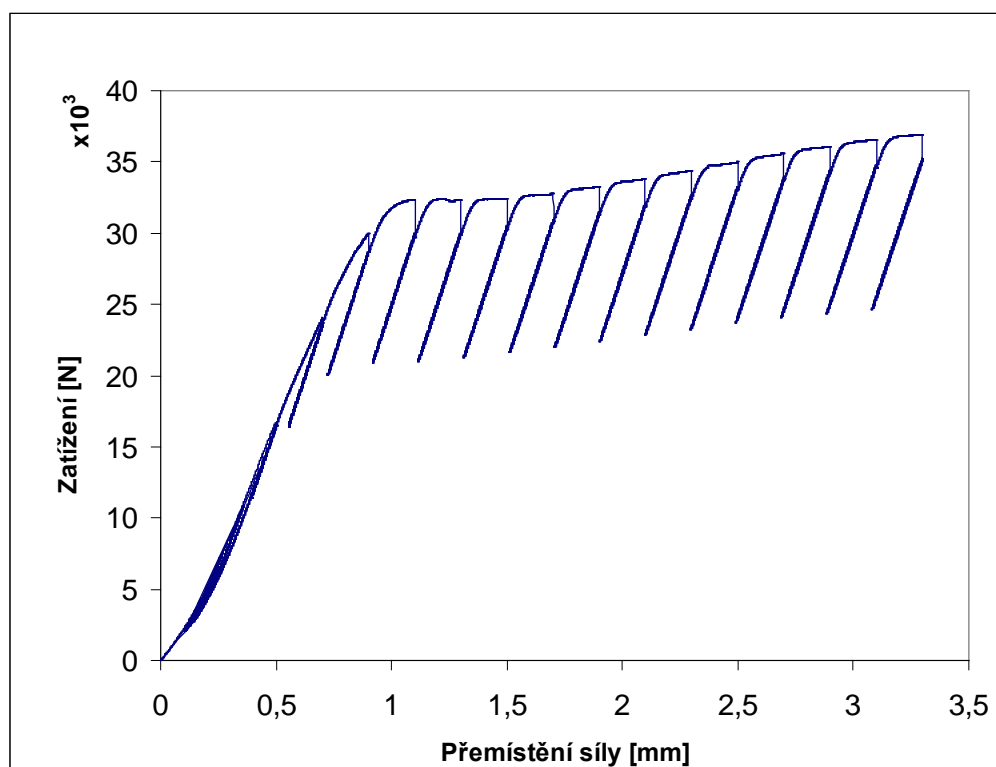
Obr. III.4 Zatěžovací křivka pro zkušební těleso LH 304



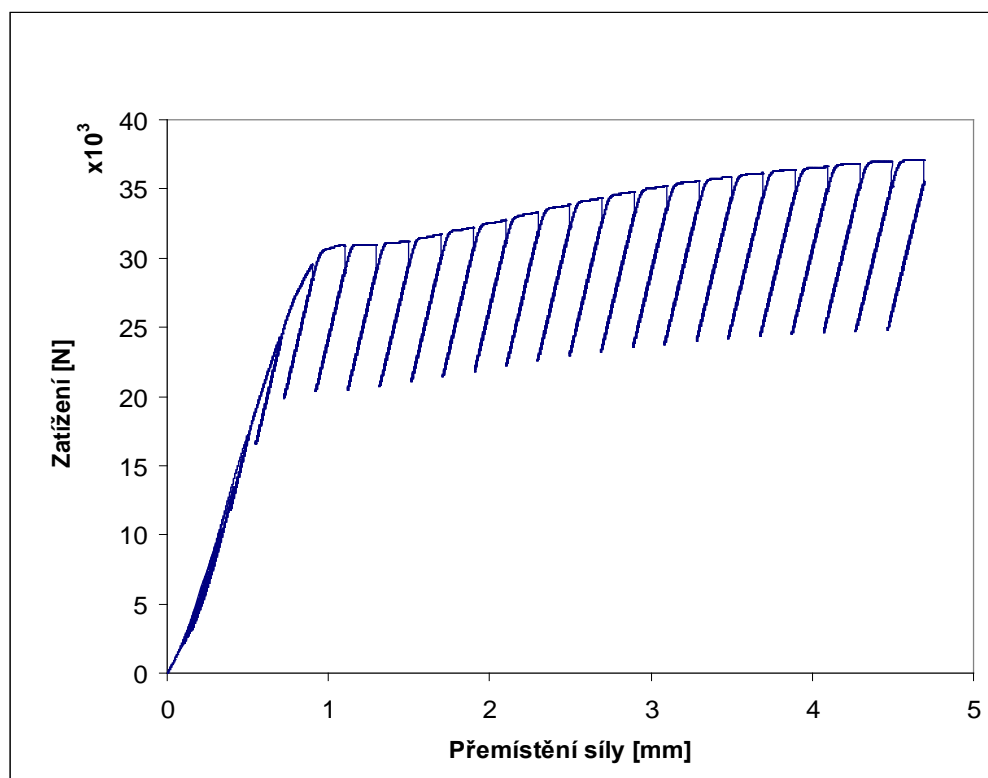
Obr. III.5 Zatěžovací křivka pro zkušební těleso LB 201



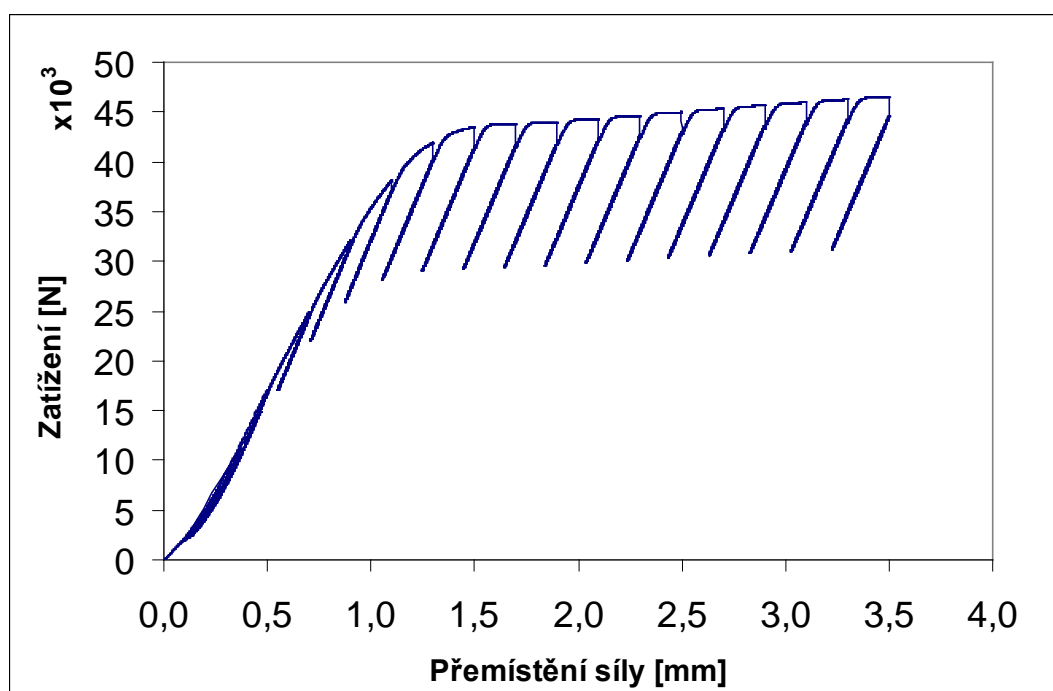
Obr. III.6 Zatěžovací křivka pro zkušební těleso LB 202



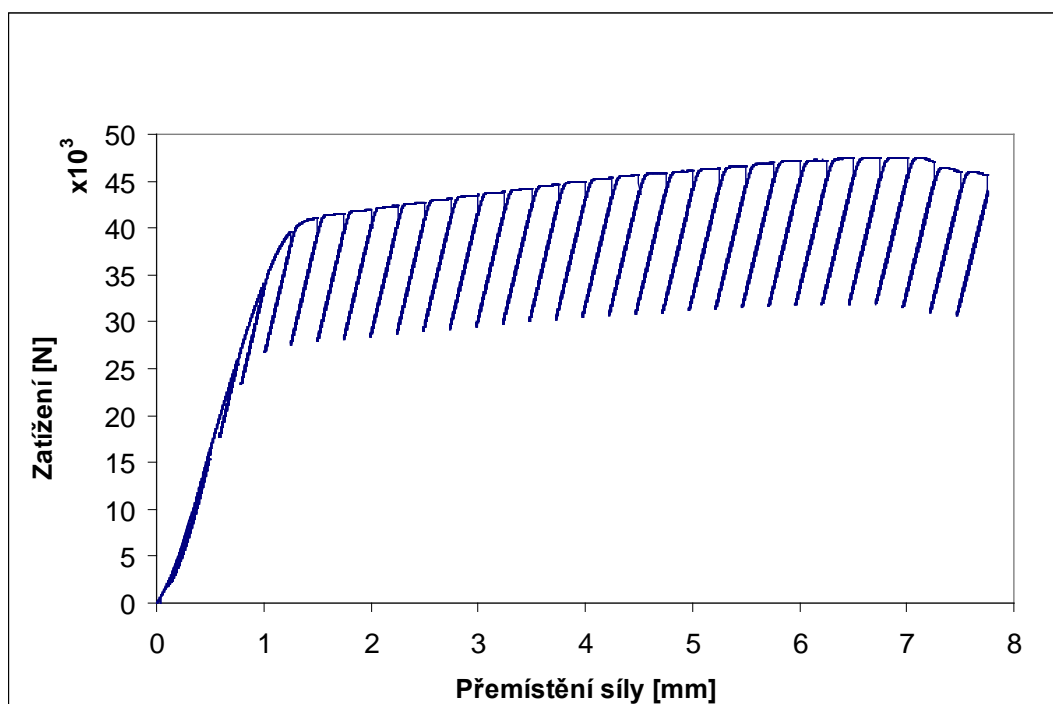
Obr. III.7 Zatěžovací křivka pro zkušební těleso LH 201



Obr. III.8 Zatěžovací křivka pro zkušební těleso LH 202



Obr. III.9 Zatěžovací křivka pro zkušební těleso LH 200



Obr. III.10 Zatěžovací křivka pro zkušební těleso LA 202

#### Příloha IV - Metalografická analýza



Obr. IV.1 Mikročistota litého materiálu



Obr. IV.2 Mikročistota litého materiálu – oxidicko-sulfidické vměstky





Obr. IV.3 Mikročisota litého materiálu – ředina



Obr. IV.4 Mikročistota tvářeného materiálu po směru tváření – sulfidické vměštky

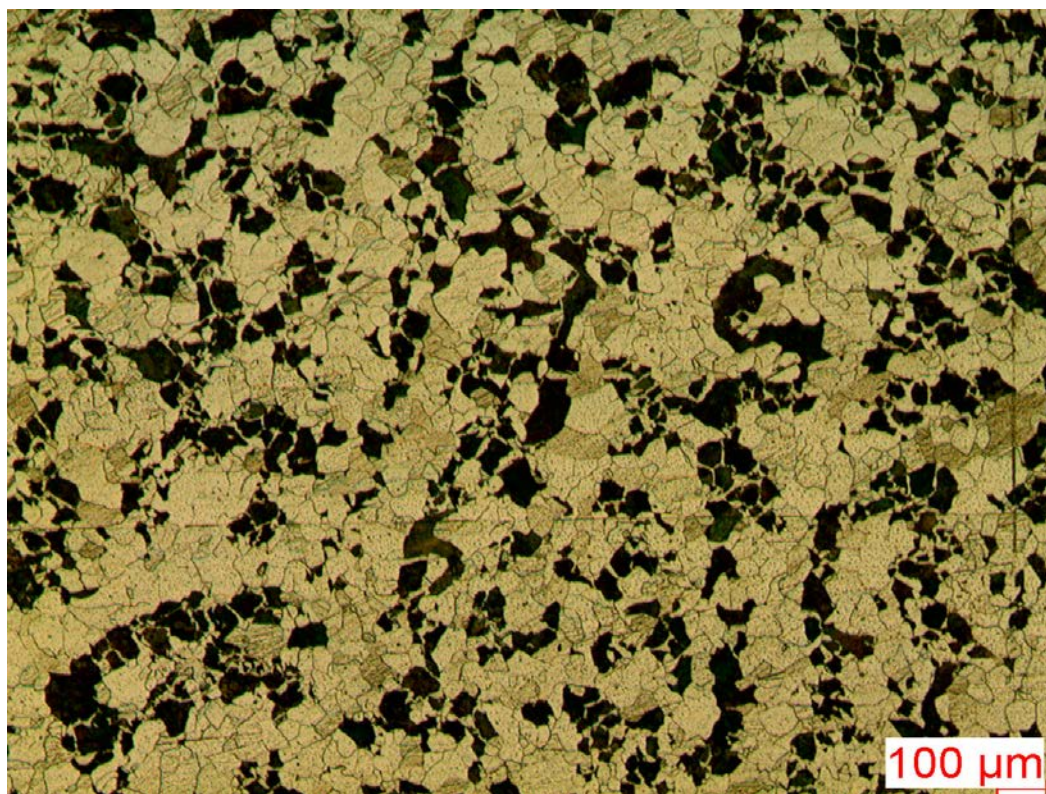


Obr. IV.5 Mikročistota tvářeného materiálu napříč směru tváření – sulfidické vměstky

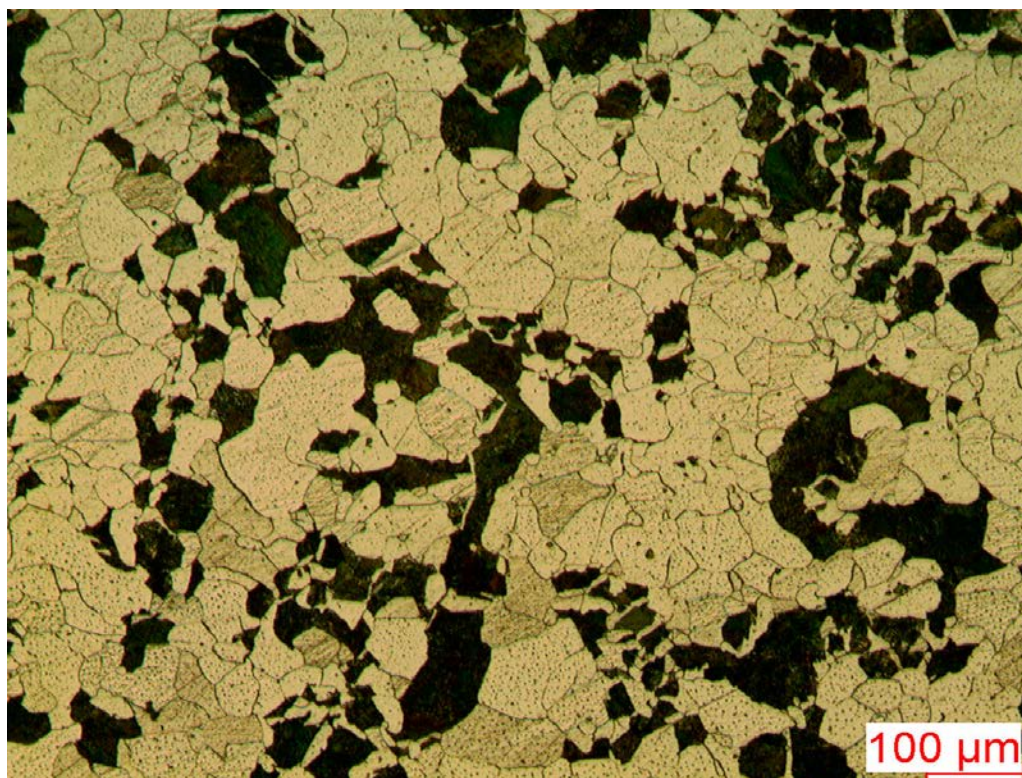


Obr. IV.6 Mikročistota svaru – bubliny po svařování



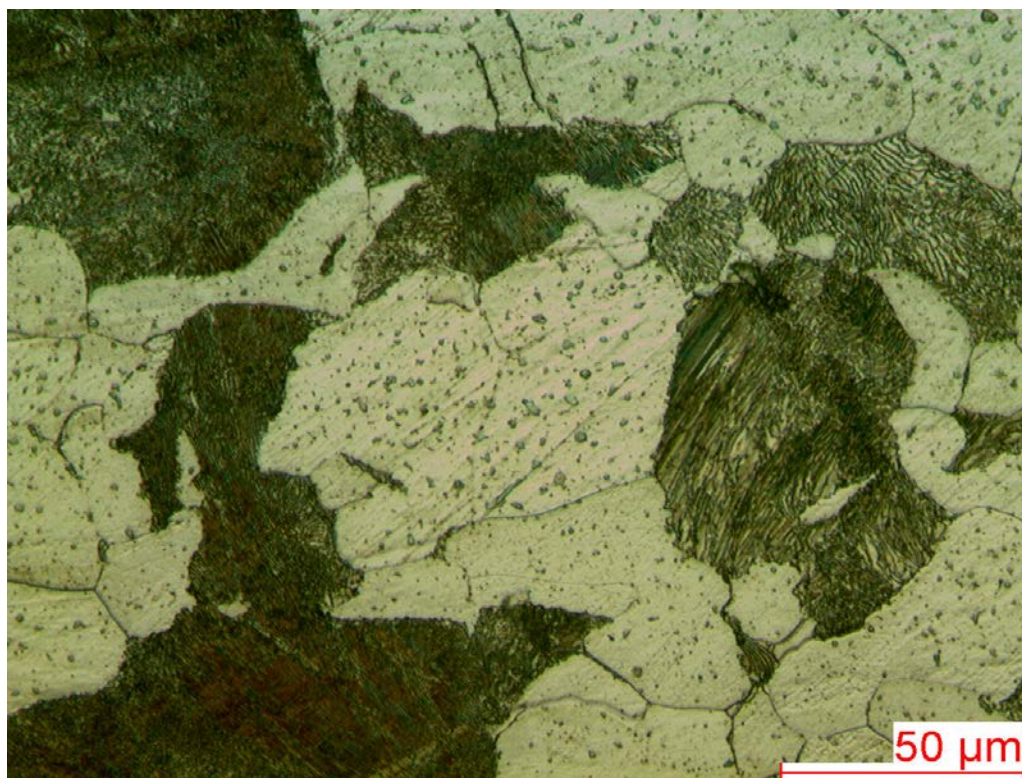


Obr. IV.7 Základní litý materiál – feriticko-perlitická struktura

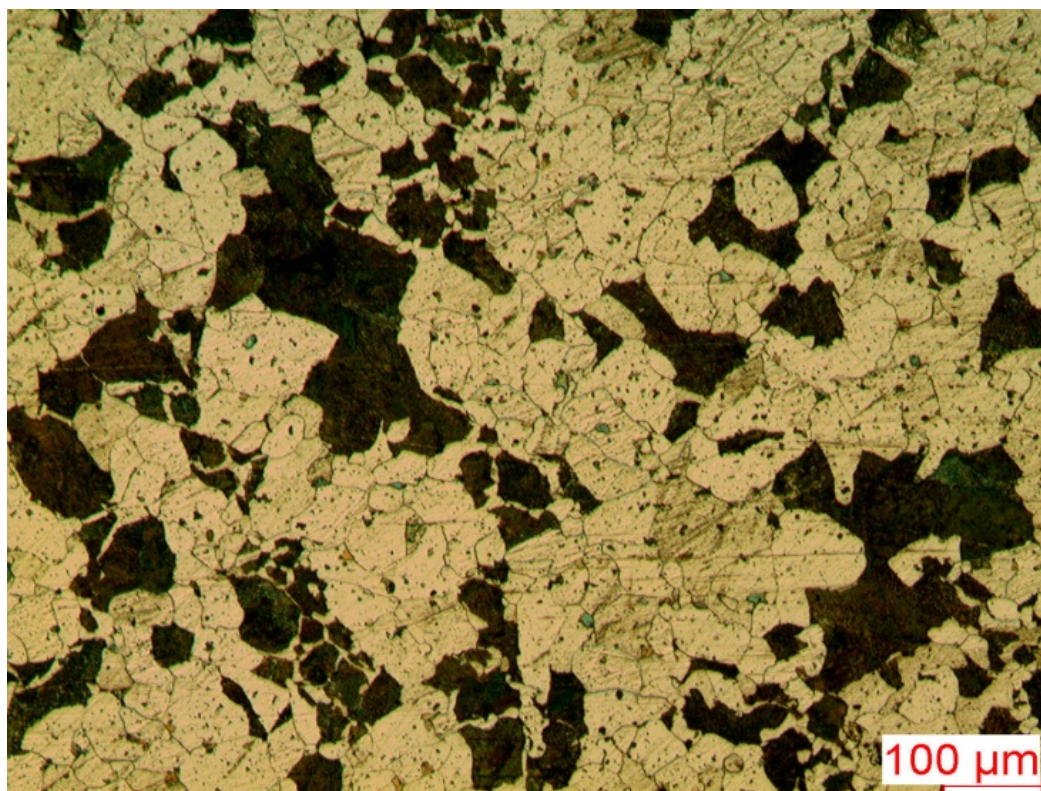


Obr. IV.8 Základní litý materiál – feriticko-perlitická struktura



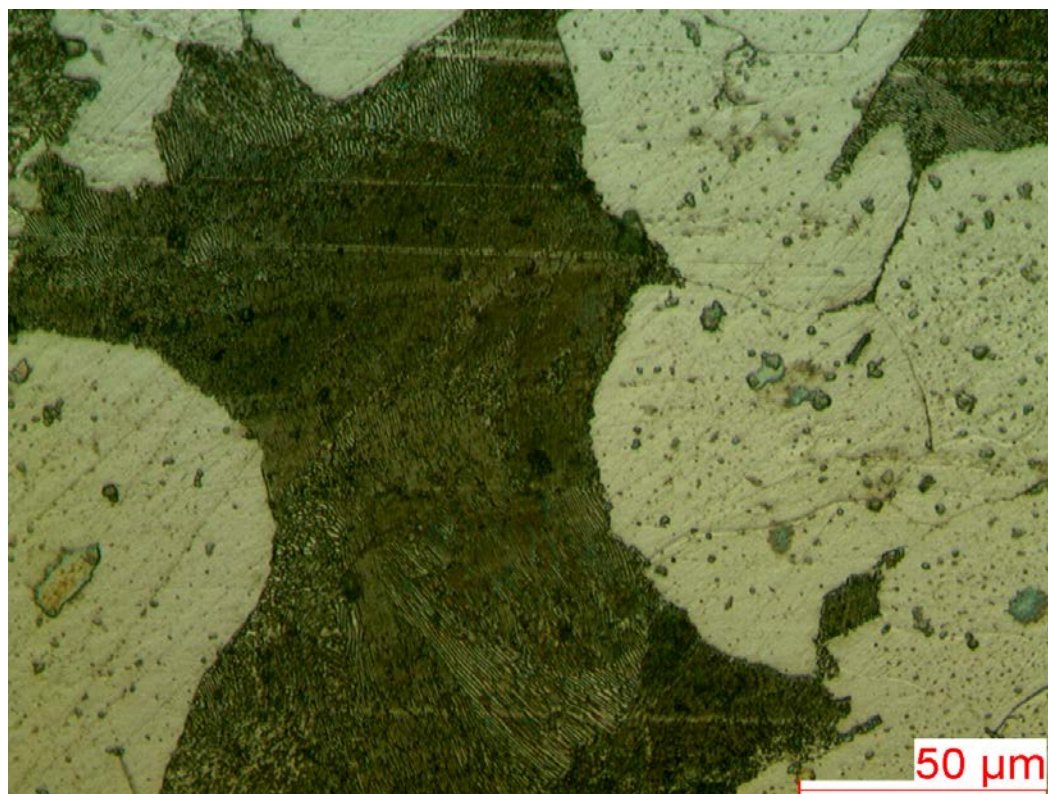


Obr. IV.9 Detail základního litého materiálu – feriticko-perlitická struktura

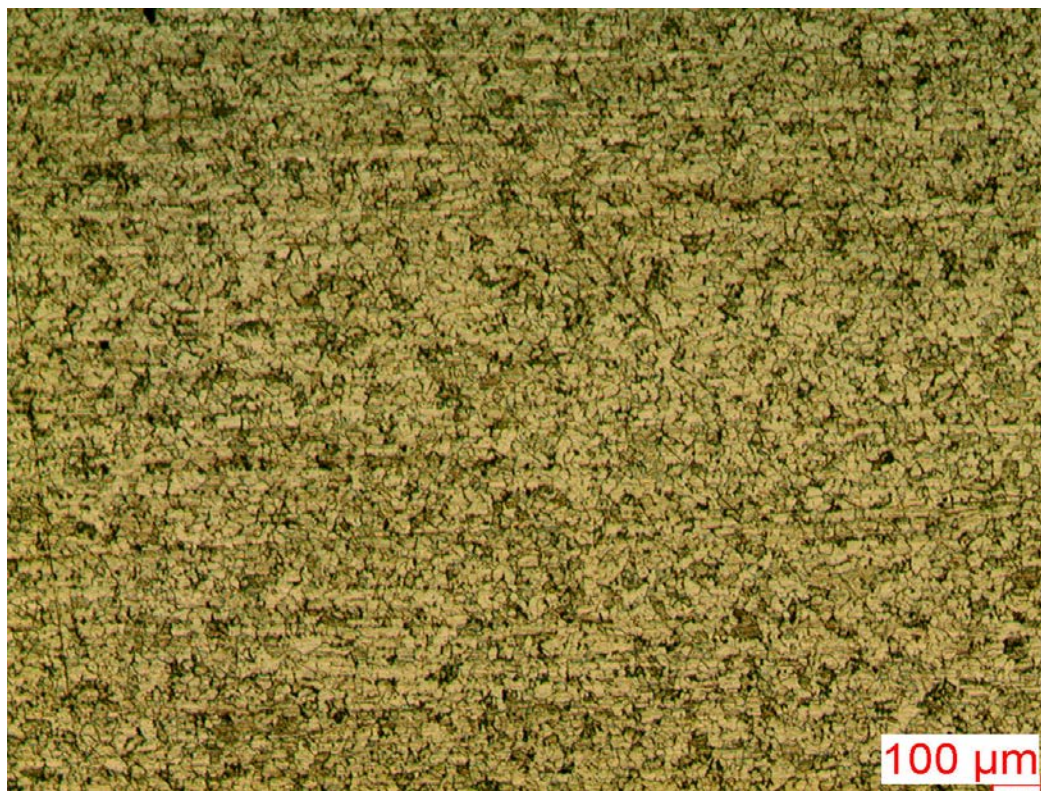


Obr. IV.10 TOZ litého materiálu – feriticko-perlitická struktura



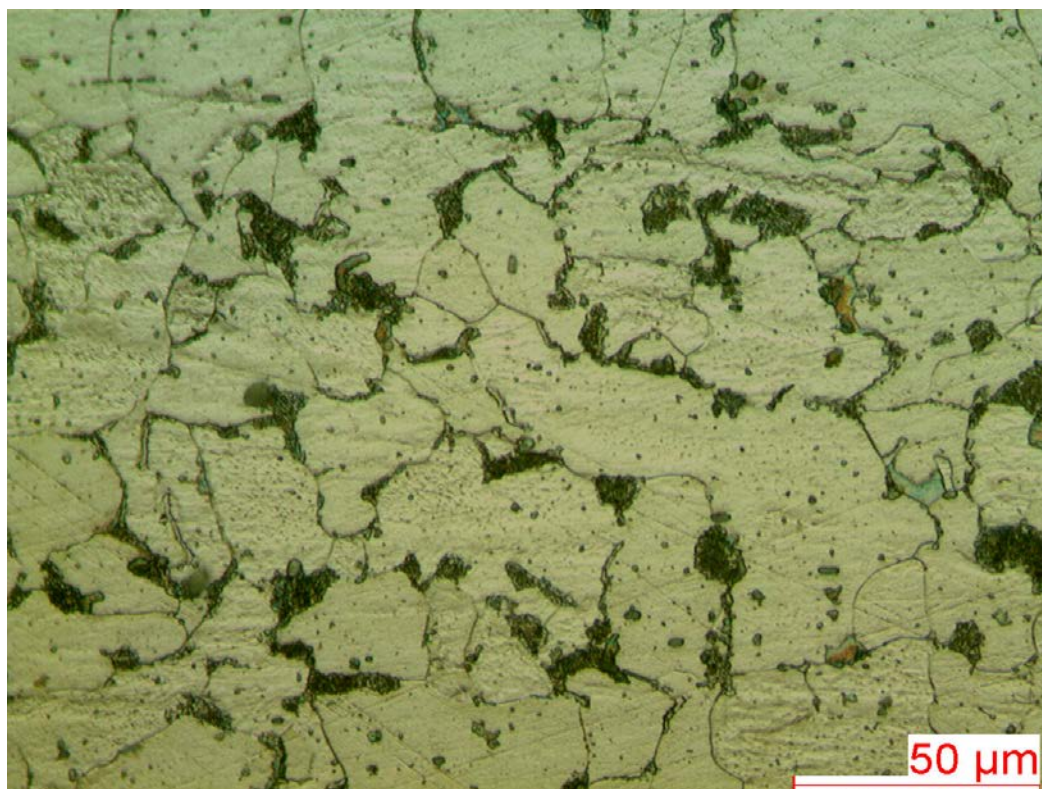


Obr. IV.11 Detail TOZ litého materiálu – feriticko-perlitická struktura

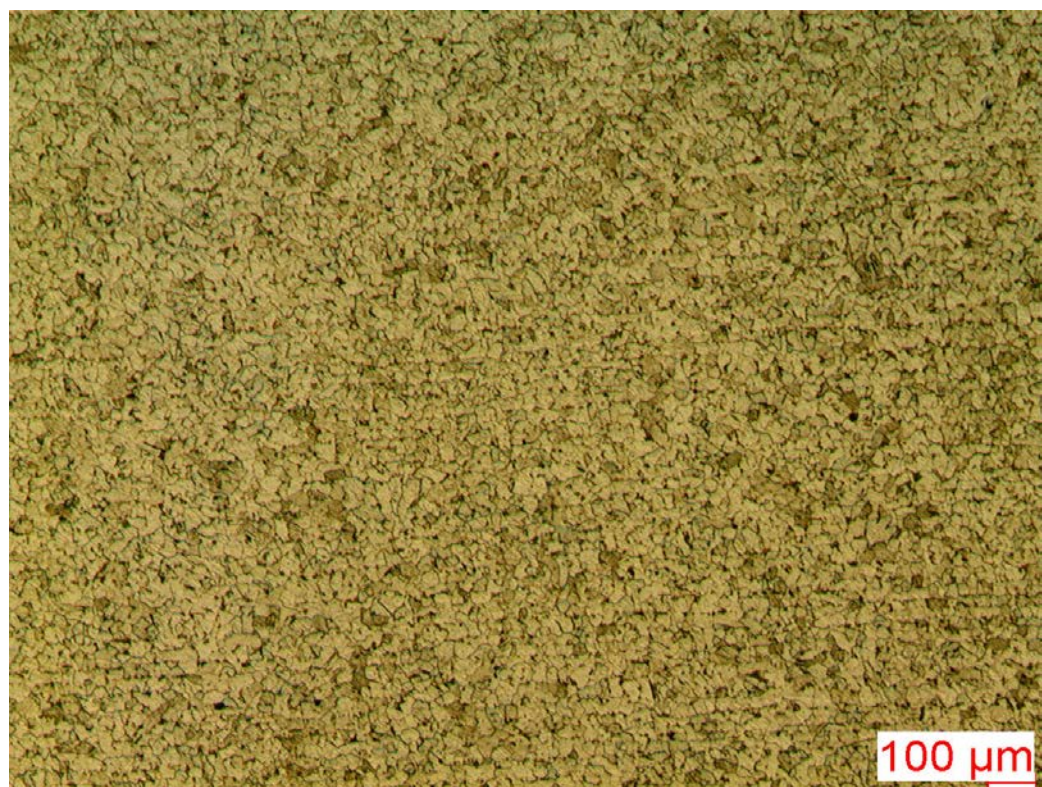


Obr. IV.12 Základní tvářený materiál ve směru válcování – řádkovitá feritická struktura



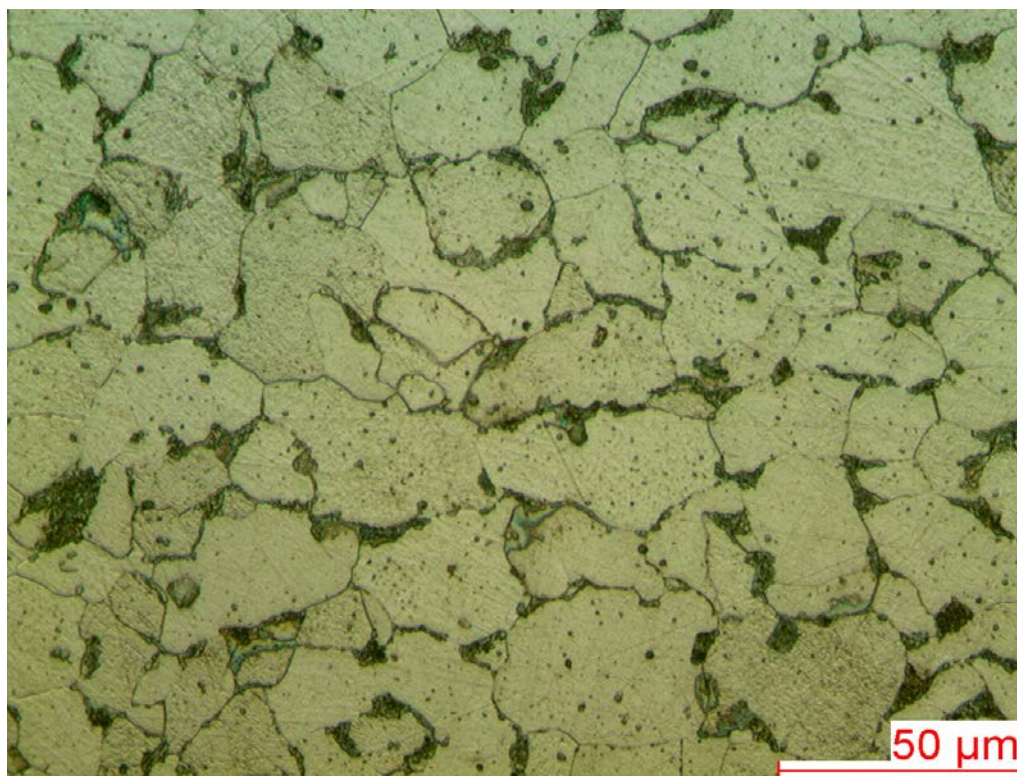


Obr. IV.13 Detail základního tvářeného materiálu – převážně feritická struktura

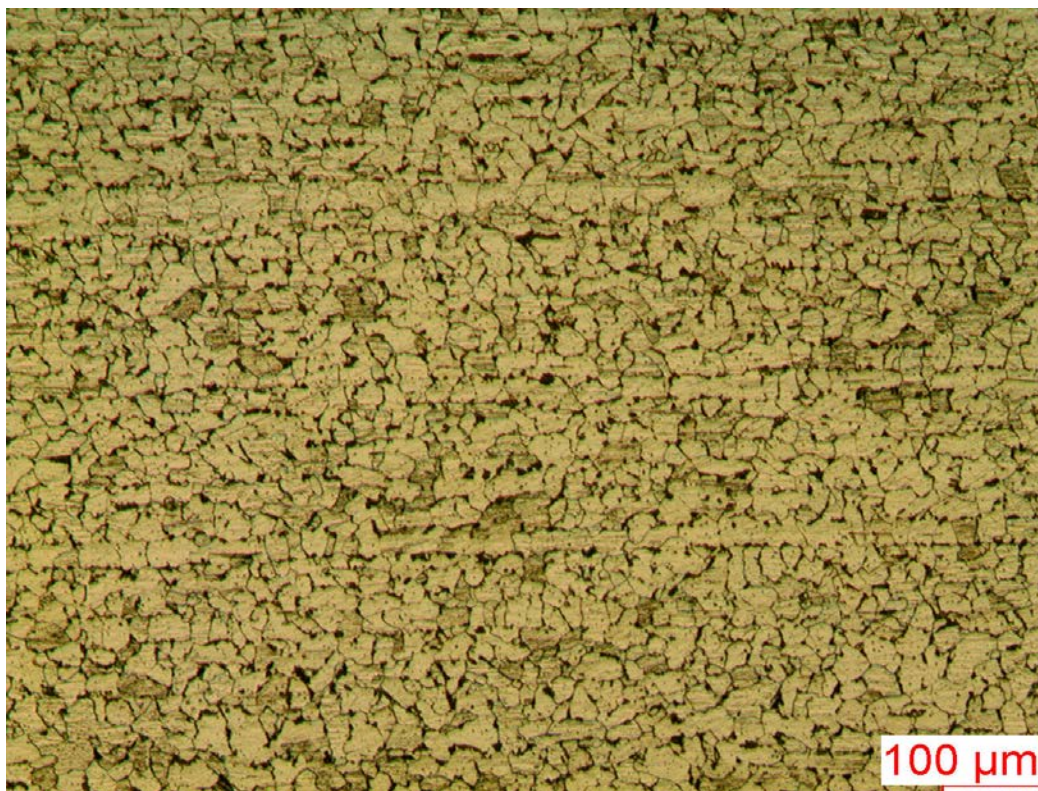


Obr. IV.14 Základní tvářený materiál napříč směru válcování – feritická struktura



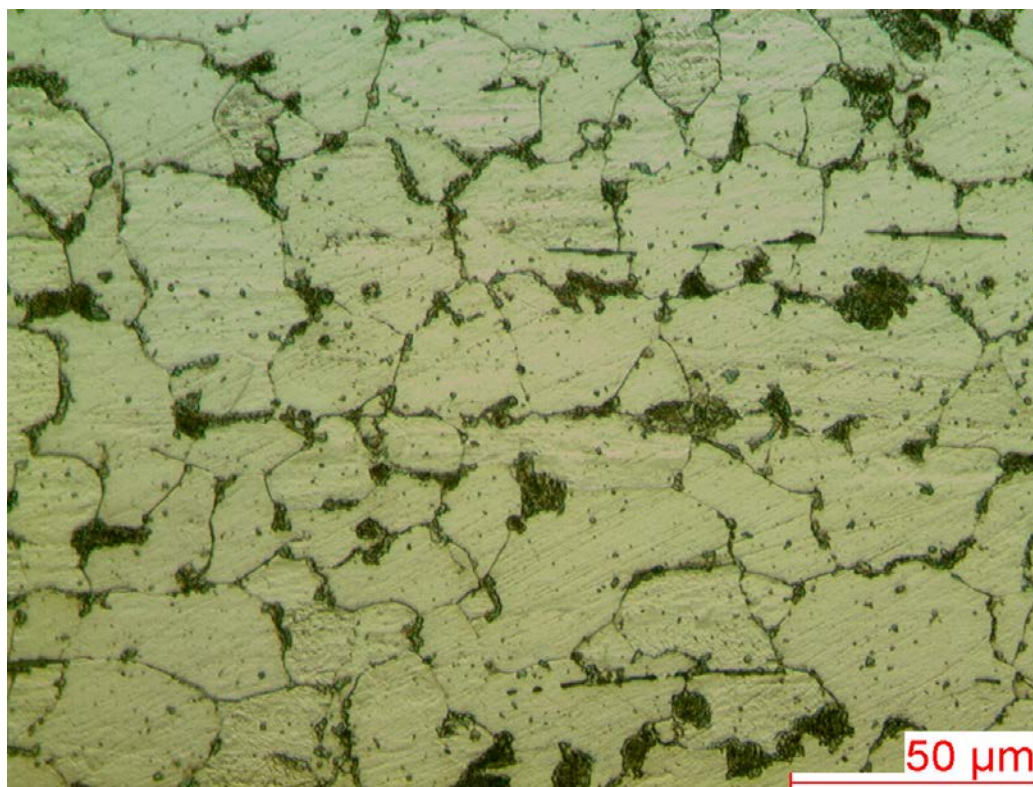


Obr. IV.15 Detail základního materiálu napříč směru tváření – převážně feritická struktura

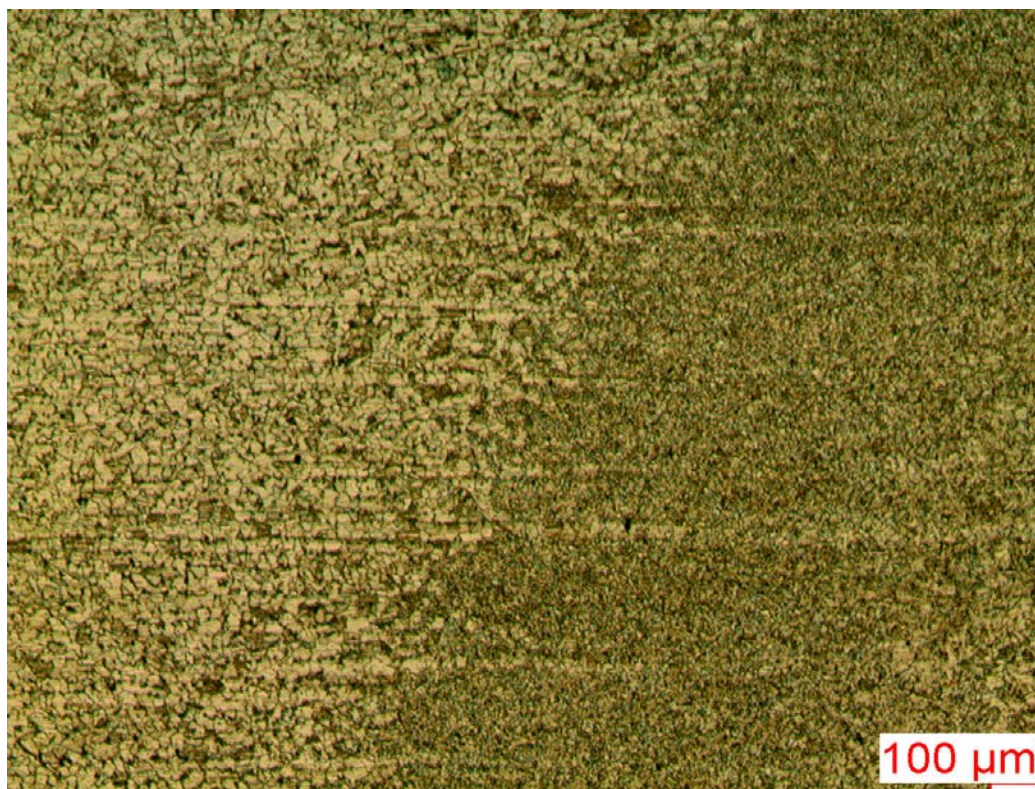


Obr. IV.16 TOZ tvářeného materiálu – řádkovitost struktury je zachována



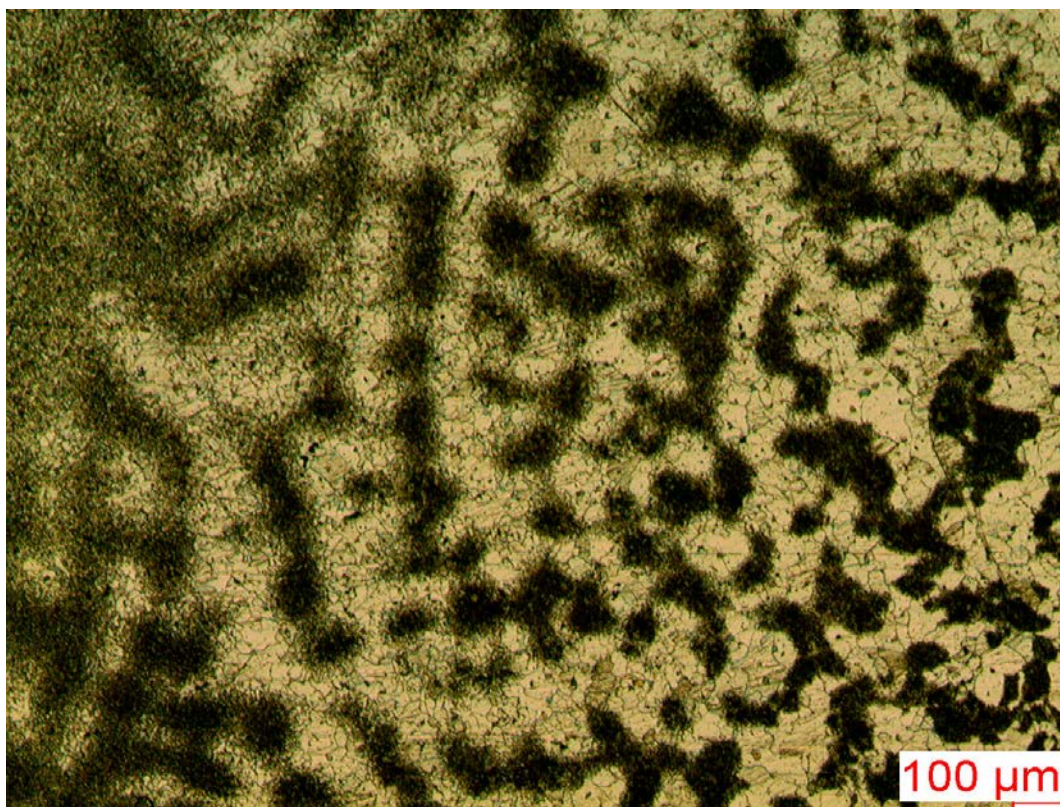


Obr. IV.17 Detail TOZ tvářeného materiálu – převážně feritická struktura

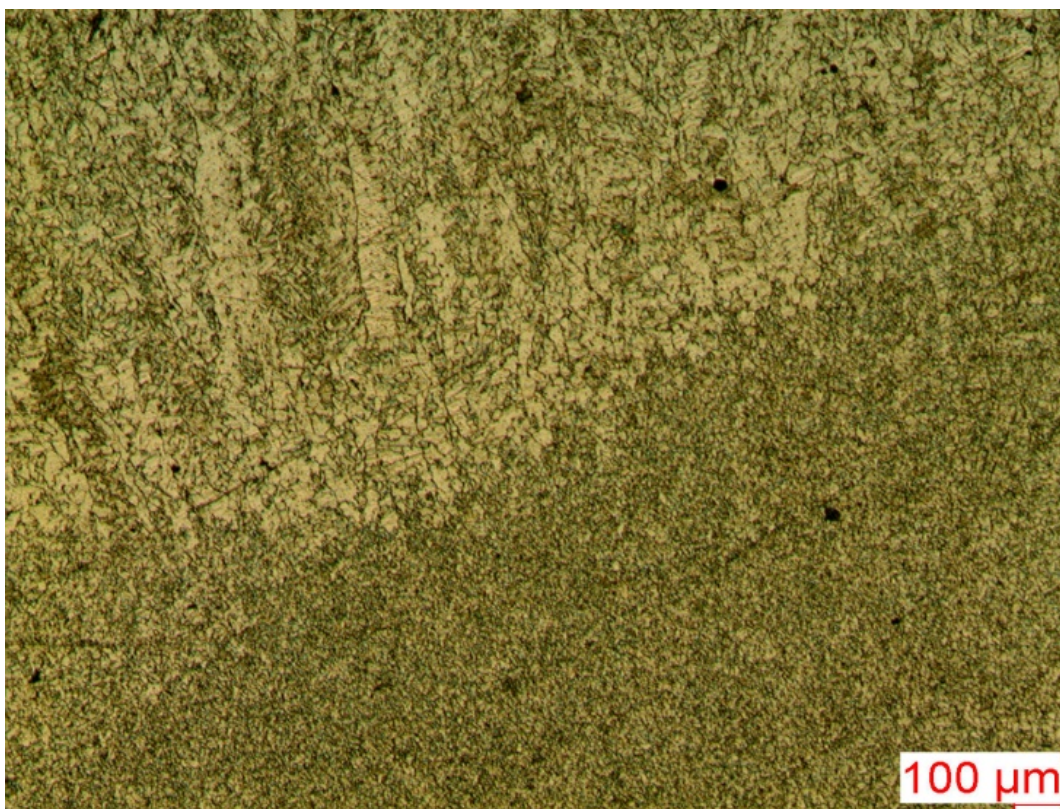


Obr. IV.18 Přejícná vrstva tvářený materiál/svar – struktura je plynule promíšena



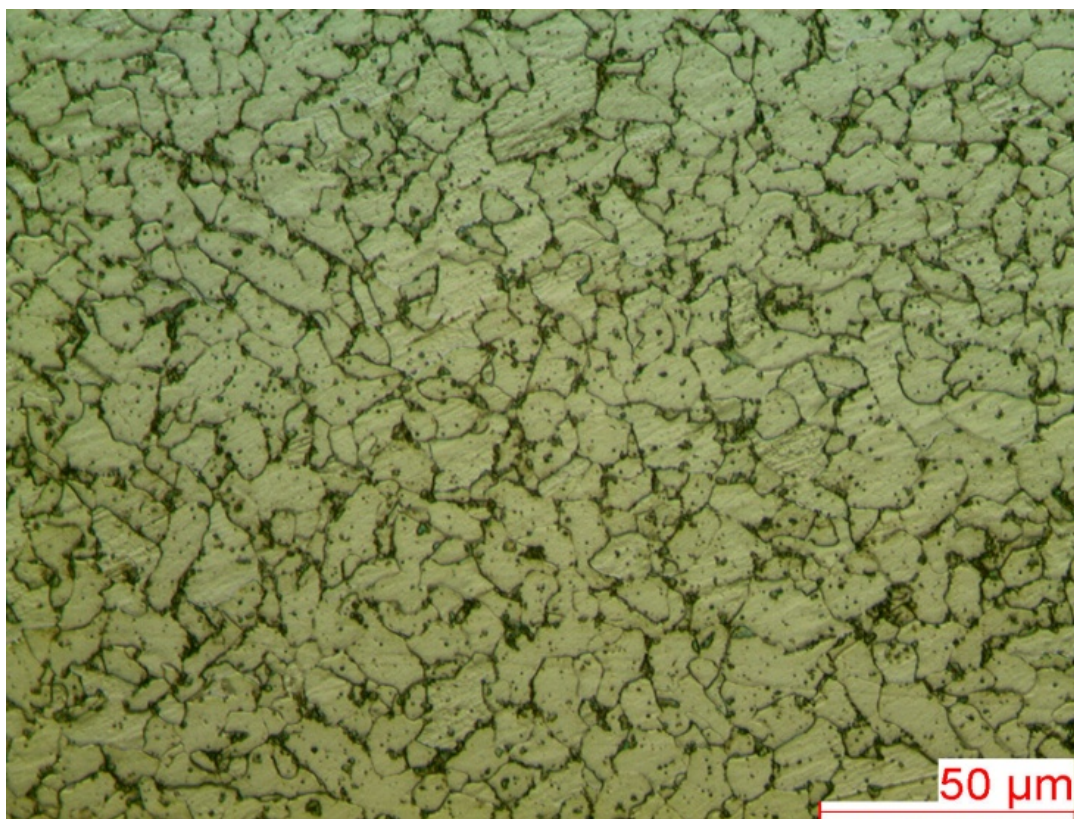


Obr. IV.19 Přejímová vrstva litý materiál/svar – feriticko-perlitická struktura, feritické zrna je rozdrobeno



Obr. IV.20 Svarový kov – lokálně zhrublé zrna postupným pokládáním materiálu





Obr. IV.21 Detail svaru – velmi jemné feritické zrno